

**Universidad de Costa Rica**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Escuela de Ingeniería Civil**

**Manejo del riesgo para la excavación  
del túnel paralelo de la Planta Hidroeléctrica Cachí**

**Trabajo de Graduación**

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

**Pamela Marín Campos**

Director de Proyecto de Graduación:

**Ing. Marco Valverde Mora; M.Sc.**

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

## Nómina

El presente trabajo de graduación fue aprobado por la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica y revisado por el Comité Asesor como requisito para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil.



---

Ing. Marco Valverde Mora; M.Sc.

Director



---

Ing. Alfonso Hidalgo Ramírez; M.Sc.

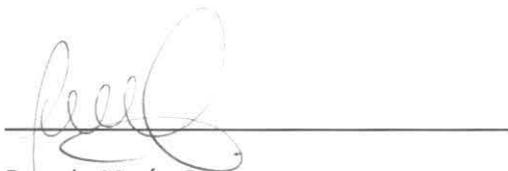
Asesor



---

Ing. Marlon Jiménez Jiménez

Asesor



---

Pamela Marín Campos

Autora

**Fecha:** 2012, mayo, 14

La suscrita, **Pamela Marín Campos**, cédula **1-1355-0189**, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **A63343**, manifiesta que es autora del Proyecto Final de Graduación **Manejo del riesgo para la excavación del túnel paralelo de la Planta Hidroeléctrica Cachí**, bajo la Dirección del **Ing. Marco Valverde Mora; M.Sc.**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

**Nota:** de acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); “no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales”. Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

## **Dedicatoria**

A Dios que es mi guía e ilumina cada paso de mi vida.

A mis papás que con esfuerzo y dedicación me hacen ser mejor persona cada día. A ellos les debo cada uno de mis logros y les estaré eternamente agradecida por darme la oportunidad de concluir esta etapa. ¡Los amo!

A mi familia que con su cariño y apoyo constantes me dan las fuerzas para seguir adelante.

A doña Marina (qdDg) que con su paso por mi vida dejó una huella en mi corazón y ahora es el ángel que me cuida desde el cielo.

## **Agradecimientos**

A los ingenieros Marco Valverde, Alfonso Hidalgo y Marlon Jiménez por sus aportes y guía para poder llevar a cabo este trabajo.

Al Ing. Adrián Naranjo y a los geólogos Jorge Bonilla y Carlos Chaves por su gentil colaboración en este proyecto.

A Gustavo Segura por comprender lo difícil de todo este proceso y haber sido siempre un compañero excepcional, no sólo de estudios, sino de vida. Gracias por cada muestra de apoyo y ánimo, por las sonrisas en el momento preciso, por darme las palabras necesarias para seguir adelante... simplemente por ser mi mejor compañía!

# Índice

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.1 Justificación</b> .....	1
1.1.1 Problema específico .....	1
1.1.2 Importancia .....	4
1.1.3 Antecedentes .....	5
<b>1.2 Objetivos</b> .....	9
1.2.1 Objetivo General .....	9
1.2.2 Objetivos Específicos .....	9
<b>1.3 Delimitación del problema</b> .....	9
1.3.1 Alcance .....	9
1.3.2 Limitaciones .....	10
<b>1.4 Marco metodológico</b> .....	10
1.4.1 Marco teórico .....	12
1.4.2 Identificación y clasificación de riesgos .....	12
1.4.3 Implementación de un plan para el manejo del riesgo .....	13
<b>CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MANEJO DEL RIESGO</b> .....	14
<b>2.1 Información del proyecto</b> .....	16
<b>2.2 Identificación del riesgo</b> .....	16
<b>2.3 Clasificación del riesgo</b> .....	17
<b>2.4 Mitigación del riesgo</b> .....	18
<b>2.5 Evaluación del riesgo</b> .....	21
<b>2.6 Movilización del riesgo</b> .....	21
<b>CAPÍTULO 3: MARCO GEOLÓGICO DEL PROYECTO</b> .....	23
<b>3.1 Geología regional</b> .....	23

<b>3.2 Geología local</b> .....	24
<b>3.3 Hidrogeología</b> .....	28
<b>3.4 Amenaza sísmica</b> .....	29
<b>CAPÍTULO 4: CONDICIONES GEOTÉCNICAS A LO LARGO DEL TÚNEL</b> .....	31
<b>4.1 Propiedades físicas y mecánicas de la roca intacta</b> .....	33
<b>4.2 Caracterización geomecánica</b> .....	35
4.2.1 <i>Deformabilidad</i> .....	35
4.2.2 <i>Resistencia al corte del macizo rocoso</i> .....	37
<b>4.3 Método de excavación</b> .....	40
<b>CAPÍTULO 5: IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE RIESGOS</b> .....	44
<b>5.1 Identificación de riesgos</b> .....	44
5.1.1 <i>Posibles riesgos durante la excavación de un túnel</i> .....	44
5.1.1.1 <i>Condiciones geológicas inesperadas</i> .....	45
5.1.1.2 <i>Inestabilidad del frente de excavación</i> .....	45
5.1.1.3 <i>Flujo de agua hacia el túnel</i> .....	46
5.1.1.4 <i>Avance a través de zonas de falla</i> .....	47
5.1.1.5 <i>Fluencia de la roca</i> .....	48
5.1.1.6 <i>Subsidencias del terreno superficial</i> .....	49
5.1.1.7 <i>Suelos o rocas expansivas</i> .....	50
5.1.1.8 <i>Roca explosiva</i> .....	51
5.1.1.9 <i>Zonas kársticas</i> .....	51
5.1.1.10 <i>Afectación por voladuras</i> .....	52
5.1.1.11 <i>Ocurrencia de un sismo</i> .....	53
5.1.2 <i>Riesgos asociados a la excavación del túnel de Cachí</i> .....	54
5.1.2.1 <i>Condiciones geológicas inesperadas</i> .....	54
5.1.2.2 <i>Inestabilidad del frente de excavación</i> .....	55

5.1.2.3	Flujo de agua hacia el túnel .....	59
5.1.2.4	Avance a través de zonas de falla .....	62
5.1.2.5	Afectación por voladuras.....	63
5.1.2.6	Afectación al túnel existente.....	64
5.1.2.8	Riesgos no analizados.....	66
<b>5.2</b>	<b>Criterios de aceptación .....</b>	<b>67</b>
<b>5.3</b>	<b>Clasificación de riesgos.....</b>	<b>69</b>
 <b>CAPÍTULO 6: MITIGACIÓN Y EVALUACIÓN DE RIESGOS .....</b>		<b>79</b>
<b>6.1</b>	<b>Análisis de riesgos.....</b>	<b>79</b>
6.1.1	<i>Inestabilidad del frente de excavación .....</i>	<i>79</i>
6.1.1.1	Análisis de causas .....	79
6.1.1.2	Análisis de consecuencias .....	80
6.1.2	<i>Flujo de agua hacia el túnel.....</i>	<i>82</i>
6.1.2.1	Análisis de causas .....	82
6.1.2.2	Análisis de consecuencias .....	82
6.1.3	<i>Avance a través de zonas de falla.....</i>	<i>84</i>
6.1.3.1	Análisis de causas .....	84
6.1.3.2	Análisis de consecuencias .....	84
6.1.4	<i>Uso de método de excavación nuevo para el ICE .....</i>	<i>87</i>
6.1.4.1	Análisis de causas .....	87
6.1.4.2	Análisis de consecuencias .....	88
<b>6.2</b>	<b>Mitigación de riesgos .....</b>	<b>88</b>
6.2.1	<i>Inestabilidad del frente de excavación .....</i>	<i>88</i>
6.2.1.1	Perforaciones al avance .....	89
6.2.1.2	Tratamiento con inyección .....	90
6.2.1.3	Sistema del "paraguas".....	91

6.2.1.4	Sistemas de sostenimiento .....	92
6.2.1.5	Excavación por fases .....	93
6.2.2	<i>Flujo de agua hacia el túnel</i> .....	95
6.2.2.1	Perforaciones al avance .....	95
6.2.2.2	Tratamiento con inyección .....	95
6.2.2.3	Construcción de acueductos .....	96
6.2.2.4	Sistemas de bombeo .....	96
6.2.3	<i>Avance a través de zonas de falla</i> .....	96
6.2.3.1	Perforaciones al avance .....	97
6.2.3.2	Tratamiento con inyección .....	97
6.2.3.3	Sistemas de sostenimiento .....	97
6.2.3.4	Túnel piloto .....	99
6.2.4	<i>Uso de método de excavación nuevo para el ICE</i> .....	99
<b>6.3</b>	<b>Evaluación de riesgos</b> .....	100
6.3.1	<i>Evaluación general del proceso</i> .....	100
6.3.2	<i>Evaluación de los resultados obtenidos</i> .....	101
<b>CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....		108
<b>7.1</b>	<b>Conclusiones</b> .....	108
<b>7.2</b>	<b>Recomendaciones</b> .....	112
<b>REFERENCIAS</b> .....		115
<b>APÉNDICE A:</b> Registro de rendimiento de la rozadora		
<b>APÉNDICE B:</b> Registros del riesgo		
<b>ANEXO A:</b> Perfil geotécnico de la línea de túnel		

## Índice de cuadros

<b>Cuadro 1.1.</b> Costos de la excavación del túnel paralelo	3
<b>Cuadro 1.2.</b> Duración de la actividad de excavación del túnel paralelo	3
<b>Cuadro 2.1.</b> Significado de símbolos empleados en el FTA	20
<b>Cuadro 4.1.</b> Porcentajes estimados de roca a excavar	31
<b>Cuadro 4.2.</b> Clasificación con base en la resistencia de la roca	34
<b>Cuadro 4.3.</b> Clasificación por dureza de las rocas del nuevo túnel	34
<b>Cuadro 4.4.</b> Resultados de ensayos de placa rígida	36
<b>Cuadro 4.5.</b> Módulos elásticos medios medidos en las paredes de las galerías de investigación	36
<b>Cuadro 4.6.</b> Módulos elásticos medios medidos en la corona y piso de las galerías de investigación	37
<b>Cuadro 4.7.</b> Módulos de elasticidad utilizados en el túnel existente	37
<b>Cuadro 4.8.</b> Parámetros de entrada al criterio de ruptura	39
<b>Cuadro 4.9.</b> Parámetros de salida del criterio de ruptura	39
<b>Cuadro 4.10.</b> Frentes de excavación	43
<b>Cuadro 5.1.</b> Índice BDI	53
<b>Cuadro 5.2.</b> Riesgos asociados a la excavación del túnel	54
<b>Cuadro 5.3.</b> Identificación de posibles zonas de inestabilidad	58
<b>Cuadro 5.4.</b> Identificación de zonas con posible presencia de agua	61
<b>Cuadro 5.5.</b> Identificación de zonas de falla	62
<b>Cuadro 5.6.</b> Definición de niveles de riesgo	68
<b>Cuadro 5.7.</b> Puntuaciones para asignar la probabilidad de ocurrencia	70
<b>Cuadro 5.8.</b> Puntuaciones para asignar el impacto de las consecuencias	71

<b>Cuadro 5.9.</b> Puntuaciones asignadas a la probabilidad	72
<b>Cuadro 5.10.</b> Puntuaciones asignadas a las consecuencias	74
<b>Cuadro 5.11.</b> Niveles de riesgo	76
<b>Cuadro 6.1.</b> Estimación de la longitud para las perforaciones al avance	89
<b>Cuadro 6.2.</b> Puntuaciones asignadas a la probabilidad	102
<b>Cuadro 6.3.</b> Puntuaciones asignadas a las consecuencias	103
<b>Cuadro 6.4.</b> Niveles de riesgo	104
<b>Cuadro 6.5.</b> Comparación de niveles de riesgo	106
<b>Cuadro 7.1.</b> Riesgos asociados a la excavación del túnel	109

## Índice de figuras

<b>Figura 1.1.</b> Componentes de la Planta Hidroeléctrica Cachi	5
<b>Figura 1.2.</b> Colapso de la autopista Nicoll en Singapur	6
<b>Figura 1.3.</b> Colapso del metro de Shanghai	6
<b>Figura 1.4.</b> Metodología propuesta para el desarrollo del trabajo	11
<b>Figura 2.1.</b> Los seis pasos cíclicos del GeoQ	16
<b>Figura 2.2.</b> Ejemplo de matriz de decisión	17
<b>Figura 2.3.</b> Ejemplo de diagrama de FTA	19
<b>Figura 3.1.</b> Materiales de la Formación Doán	23
<b>Figura 3.2.</b> Geología local del nuevo túnel	26
<b>Figura 3.3.</b> Geología local del nuevo túnel	27
<b>Figura 4.1.</b> Perforación PHCHT2-1, de 132,60 m a 138,90 m	32
<b>Figura 4.2.</b> Perforación PHCHT2-2, de 209,70 m a 216,85 m	32
<b>Figura 4.3.</b> Perforación PHCHT2-6, de 140,0 m a 156,50 m	33
<b>Figura 4.4.</b> Valores del parámetro $D$ del criterio de Hoek & Brown	38
<b>Figura 4.5.</b> Rozadora MT360 de 200 kW	41
<b>Figura 4.6.</b> Cabeza de corte de eje transversal	42
<b>Figura 4.7.</b> Plantilla de voladura para el nuevo túnel	43
<b>Figura 5.1.</b> Presencia de agua en el túnel del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís	47
<b>Figura 5.2.</b> Aproximación para estimar la ocurrencia del fenómeno de fluencia	49
<b>Figura 5.3.</b> Índice geológico de resistencia (GSI)	57
<b>Figura 5.4.</b> Longitud de pase y tiempos de estabilidad sin soporte	59

<b>Figura 5.5.</b> Perfilado irregular del frente de excavación	65
<b>Figura 5.6.</b> Estimación del fenómeno de fluencia para el túnel de Cachi	66
<b>Figura 5.7.</b> Matriz de decisión	69
<b>Figura 5.8.</b> Clasificación de riesgos	77
<b>Figura 6.1.</b> Análisis de causas de inestabilidad en el frente de excavación	80
<b>Figura 6.2.</b> Análisis de consecuencias por inestabilidades en el frente de excavación	81
<b>Figura 6.3.</b> Análisis de causas de flujo de agua hacia el túnel	82
<b>Figura 6.4.</b> Análisis de consecuencias por flujo de agua hacia el túnel	83
<b>Figura 6.5.</b> Análisis de causas de avance a través de zonas de fallas	85
<b>Figura 6.6.</b> Análisis de consecuencias por avance a través de zonas de fallas	86
<b>Figura 6.7.</b> Análisis de causas de uso de método de excavación nuevo	87
<b>Figura 6.8.</b> Análisis de consecuencias por método de excavación nuevo	88
<b>Figura 6.9.</b> Ejemplo de tratamiento con inyección para el túnel de Cachi	90
<b>Figura 6.10.</b> Proceso de avance con inyección	91
<b>Figura 6.11.</b> Sistema del "paraguas"	92
<b>Figura 6.12.</b> Sistema de excavación por fases: machón central	94
<b>Figura 6.13.</b> Excavación a media sección	94
<b>Figura 6.14.</b> Clasificación de riesgos	105
<b>Figura 6.15.</b> Comparación de niveles de riesgo	106
<b>Figura 7.1.</b> Perfil de riesgos para el nuevo túnel	111

Marín Campos, Pamela

## **Manejo del riesgo para la excavación del túnel paralelo de la Planta Hidroeléctrica Cachí**

Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José, C.R.:

P. Marín C., 2012

xiii, 118, [12]h; ils. col. – 33 refs.

### **Resumen del proyecto**

En este trabajo se implementa un plan para gestionar y reducir los riesgos asociados a la excavación del nuevo túnel de la Planta Hidroeléctrica Cachí, el cual presenta la particularidad de ser una estructura paralela al túnel existente y además, utilizar un método de excavación con rozadora, nunca antes utilizado en el país. Conviene resaltar que el trabajo se orienta exclusivamente hacia los riesgos relacionados con las condiciones geológicas y geotécnicas en las que se desarrollará el nuevo túnel, por lo que no se han considerado aspectos de tipo ambiental, social o legal.

La metodología empleada consiste en seis pasos: información del proyecto, identificación, clasificación, mitigación, evaluación y movilización del riesgo. Mediante la aplicación de cada uno de estos pasos se busca que la excavación del nuevo túnel se realice con un perfil de riesgos definido y aceptable, de manera que esta actividad se desarrolle dentro del cronograma y presupuesto definidos.

El manejo del riesgo realizado ha permitido identificar de manera temprana las situaciones de peligro relacionadas con la excavación del túnel y así, a través de su probabilidad de ocurrencia e impacto de sus consecuencias, establecer el nivel de riesgo que cada una de ellas representa. Con base en los criterios de aceptación del proyecto, se han definido los riesgos críticos, a los cuales fue necesario asignar medidas para su mitigación y evaluar su efectividad.

Además, al efectuar el adecuado registro de los riesgos identificados, se facilita la transferencia de esta información a las etapas posteriores, lo cual propicia la continua aplicación de esta metodología y por ende, mejores resultados en el desarrollo y funcionamiento del túnel. P.M.C.

**RIESGO; EXCAVACIÓN; TÚNEL; MITIGACIÓN.**

Ing. Marco Valverde Mora; M.Sc.

Escuela de Ingeniería Civil

# - Capítulo 1 - INTRODUCCIÓN

---

## **1.1 Justificación**

### ***1.1.1 Problema específico***

Los suelos y las rocas son materiales muy complejos cuyas condiciones y propiedades varían de un punto a otro, lo cual genera que su comportamiento no pueda ser conocido totalmente. Toda obra de ingeniería civil se encuentra relacionada con estos materiales debido a que finalmente serán éstos los que absorberán las cargas que la estructura le transmitirá. Por lo tanto, la incertidumbre que gira en torno a las condiciones geotécnicas, será inherente a cualquier proyecto ingenieril.

La incertidumbre a la que se hizo mención anteriormente trae consigo la existencia de riesgos que pueden poner en peligro el desarrollo de un proyecto, debido a las potenciales consecuencias adversas que éstos pueden generar. Cabe aclarar que los riesgos no dependen únicamente de la incertidumbre asociada a las condiciones del material, sino que también se deben a la correlación de una serie de factores (ambientales, sociales y económicos, por ejemplo) que propician situaciones de peligro.

Ningún proyecto está exento del peligro, por esta razón es que surge la necesidad de encontrar un nivel de riesgo aceptable que asegure el adecuado desarrollo de los trabajos a realizar. De igual forma, se hace necesario el establecimiento de planes que permitan identificar a tiempo condiciones desfavorables e implementar oportunamente las soluciones convenientes al respecto.

Actualmente, el desarrollo de la sociedad trae consigo la concepción de proyectos más complejos, lo cual se traduce en mayores controles de calidad, seguridad, tiempo y costo. Parte de los riesgos que surgen durante el transcurso de un determinado trabajo se deben a los peligros que las condiciones del terreno provocan, razón por la cual resulta indispensable llevar a cabo un adecuado manejo de los riesgos asociados a tales condiciones. De esta manera, se abre la posibilidad de suplir las demandas de los proyectos en la actualidad, debido a que se propicia que éstos sean entregados a tiempo y dentro del presupuesto.

Existe una diferencia importante entre análisis del riesgo (*risk assessment*) y manejo del mismo (*risk management*), cabe mencionar que la mayoría de las veces, los proyectos se encuentran enfocados únicamente en el primero de estos conceptos. Los diseños se evalúan en términos de probabilidad de falla, en lugar de tomar en consideración tanto este aspecto como las consecuencias que la misma provoca. Esto representa un problema debido a que, en ocasiones, serán estas consecuencias las que comprometerán la integridad y seguridad de las estructuras.

Para el caso específico de la Planta Hidroeléctrica Cachí, durante la construcción del primer túnel (entre los años 1962-1967) se realizaron las previstas para la excavación de un túnel paralelo, por tal motivo, el alineamiento al inicio y al final de la estructura ya estaba predeterminado. Debido a lo anterior, las posibilidades para modificar tales alineamientos son prácticamente nulas, lo cual genera que los trabajos de diseño y construcción se adecúen a las condiciones presentes en el trazado definido. Conviene resaltar que la distancia entre ambos túneles oscilará entre 30,0 m y 50,0 m, por lo tanto, debe procurarse que los trabajos de construcción no afecten en forma significativa el túnel existente ni el funcionamiento normal de la Planta.

Toda obra de ingeniería tiene imprevistos asociados y los túneles no son la excepción, de hecho, dichas estructuras presentan los mayores imprevistos en este tipo de proyectos. Para el túnel de Cachí se utilizará, por primera vez en el país, una rozadora para los trabajos de excavación; por tal motivo, se cuenta con poca información para la estimación de costos y rendimientos en materiales típicos de nuestro medio, lo cual hace que la actividad de excavación posea el mayor porcentaje de imprevistos (aproximadamente un 18%). Además, en la programación realizada se estipuló una holgura de mes y medio para esta parte del proyecto, misma que podría considerarse poca si se toman en cuenta las dificultades que podrían presentarse con el avance cercano al túnel existente, principalmente al inicio y al final del trazado. Lo anterior crea la necesidad de disminuir la probabilidad y/o consecuencias de los riesgos que puedan generar un impacto significativo en el desarrollo del proyecto.

La ampliación de la Planta Hidroeléctrica Cachí tendrá un costo de 125 millones de dólares, de los cuales un 40% corresponde a la construcción del túnel y, específicamente, un 25% está asociado a su excavación. De esta forma se recalca el peso que esta

actividad presenta dentro del proyecto y con ello se reitera la necesidad de evitar atrasos importantes que generen mayores costos. En el Cuadro 1.1 se muestra el detalle de los costos asociados a esta actividad.

**Cuadro 1.1**  
Costos de la excavación del túnel paralelo

<b>Actividad</b>	<b>Costo Directo (\$)</b>	<b>Imprevistos (%)</b>	<b>Costo Total (\$)</b>	<b>% del Costo Total</b>
Excavación Ventana A (275 m)	1 190 233	18,0	1 404 900	1,1
Excavación Túnel 1 - Boca 2 (864 m)	3 350 843	18,4	3 966 990	3,2
Excavación Túnel 2 - Boca 1 (1600 m)	6 205 266	18,4	7 346 276	5,9
Excavación Ventana B (100 m)	432 812	18,0	510 872	0,4
Excavación Túnel 2 - Boca 2 (1600 m)	6 924 991	18,0	8 173 962	6,6
Excavación Túnel 3 - Boca 1 (1997 m)	7 744 947	18,4	9 169 677	7,3
<b>Total</b>	<b>25 849 092</b>	<b>18,2</b>	<b>30 572 677</b>	<b>24,5</b>

Fuente: ICE, 2010

De igual manera, se resalta que la construcción del proyecto tiene una duración de 1321 días (3,6 años), de la cual aproximadamente un 35% (467 días) está destinada a los trabajos de excavación. Lo anterior evidencia que retrasos durante la excavación del túnel representarán atrasos significativos en todo el proyecto. En el Cuadro 1.2 se muestra el detalle de la actividad de excavación.

**Cuadro 1.2**  
Duración de la actividad de excavación del túnel paralelo

<b>Actividad</b>	<b>Duración (días)</b>
Excavación Ventana A (275 m)	52
Excavación Túnel 1 - Boca 2 (864 m)	112
Excavación Túnel 2 - Boca 1 (1600 m)	129
Excavación Ventana B (100 m)	31
Excavación Túnel 2 - Boca 2 (1600 m)	262
Excavación Túnel 3 - Boca 1 (1997 m)	168
<b>Total</b>	<b>467</b>

Fuente: ICE, 2010

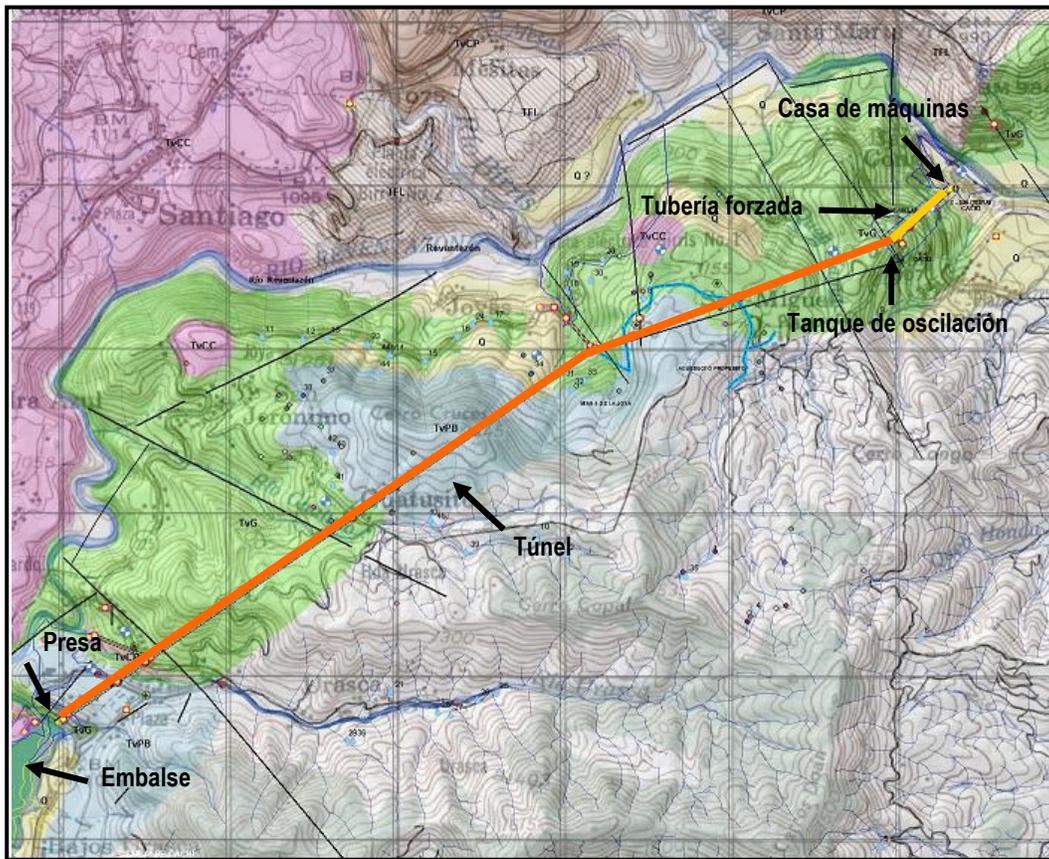
### **1.1.2 Importancia**

El proyecto de ampliación de la Planta Hidroeléctrica Cachí forma parte del plan de expansión de la generación para atender la futura demanda de energía eléctrica del país. Dicha ampliación se presenta como una alternativa a otros proyectos (nuevas plantas hidroeléctricas), de manera que se pueda incrementar la producción de la energía y potencia a un menor costo y en menos tiempo.

En este momento la Planta posee una capacidad de 100 MW, con una generación promedio anual de 657 GWh; en la Figura 1.1 se muestran los componentes que actualmente forman parte de la Planta. Con la ampliación a realizar, la potencia total se incrementará en alrededor de 55 MW y la energía en 300 GWh como promedio. Lo anterior será posible mediante la construcción de un nuevo túnel de 6051 m, tanque de oscilación, tubería forzada y ampliación de la casa de máquinas, a la cual se le añadirá una turbina más (unidad Francis de eje vertical). Cabe resaltar que el impacto ambiental de este proyecto es mínimo debido a que las nuevas estructuras son relativamente pequeñas, en su mayoría subterráneas y cercanas a las obras existentes.

El riesgo y la incertidumbre, junto con las posibles consecuencias que se pueden generar, son aspectos inherentes a cualquier proyecto de ingeniería civil en general, y de ingeniería geotécnica específicamente. Por esta razón es importante contar con una herramienta que permita generar un mayor control sobre los riesgos que se pueden presentar en el desarrollo de una obra.

El éxito de un proyecto puede estar ligado al adecuado manejo de los riesgos existentes, es decir, al control y minimización de las causas y/o consecuencias que tales riesgos representan. Lo anterior se traduce en menos retrasos, aceleración del proceso de construcción, costos dentro del presupuesto determinado y protección de la vida humana, aspectos deseables en cualquier tipo de obra.



**Figura 1.1**  
Componentes de la Planta Hidroeléctrica Cachí  
Fuente: ICE, 2010

Debido a la envergadura del proyecto en análisis, es importante que los riesgos ligados a cada actividad sean evitados o minimizados en la mayor medida posible. Lo anterior con el fin de no generar mayores costos que los presupuestados, ni atrasos que afecten los plazos de entrega definidos. De igual forma, la construcción de las nuevas estructuras no debe comprometer la integridad de las obras existentes ni el funcionamiento normal de la Planta, razón por la cual, el manejo del riesgo toma aún mayor relevancia.

### **1.1.3 Antecedentes**

El sector de la construcción se caracteriza por reunir una serie de factores de diversa índole que atentan contra el desarrollo normal de un proyecto. Los túneles no escapan de esta condición, a través del tiempo se ha observado como estas obras colapsan durante su construcción y generan pérdidas en el ámbito social y económico.

Wagner y Knights (2006) señalan que para un período de 10 años, las pérdidas contabilizadas en el colapso de 15 túneles alrededor del mundo alcanzaron sumas superiores a los 500 millones de dólares, lo cual es un reflejo de la magnitud de los problemas que las situaciones de riesgo pueden provocar. Las Figuras 1.2 y 1.3 ilustran dos ejemplos del impacto desencadenado por el colapso de un túnel.



**Figura 1.2**

Colapso de la autopista Nicoll en Singapur  
Fuente: Wagner y Knights, 2006



**Figura 1.3**

Colapso del metro de Shanghai  
Fuente: Wagner y Knights, 2006

A raíz de la problemática generada por el colapso de túneles, se hizo necesaria la búsqueda de soluciones que permitieran mantener un mayor control sobre la estabilidad e integridad de este tipo de obras. Se hizo evidente que las condiciones del suelo generan una gran influencia sobre los aspectos mencionados, por esto, la búsqueda de soluciones se orientó hacia métodos que permitieran el manejo de tales condiciones.

Por muchos años el manejo o gestión del riesgo ha sido aplicado en diversas áreas de trabajo, no así en el sector de la construcción, a pesar de la incertidumbre y altos riesgos que éste presenta. Es por esta razón que poco a poco se han incorporado los conceptos de esta metodología en todas las fases del desarrollo de un proyecto, desde su factibilidad hasta las etapas de operación y mantenimiento.

En vista de los desafíos en cuanto a costo, tiempo y calidad que enfrenta la industria de la construcción día a día, la implementación del manejo del riesgo se ha presentado como una buena opción para suplir tales exigencias. Lo anterior se refleja en el éxito obtenido en algunos países de Europa (Reino Unido, Dinamarca y Países Bajos), Hong Kong y Australia; los cuales se han dedicado a innovar y perfeccionar esta metodología con base en experiencias pasadas.

Van Staveren (2006) presenta el manejo del riesgo geotécnico como un proceso desarrollado de manera empírica, el cual se deriva de diferentes ciencias (economía, administración e ingeniería) y se complementa con conceptos físicos, estadísticos y geológicos, e incluso psicológicos y filosóficos.

El mismo autor señala que se han establecido procesos que giran en torno a los conceptos del manejo del riesgo, como por ejemplo MARIUN (MANaging RIsk an UNcertainty) en el Reino Unido y RISMAN (RISK MANagement) en los Países Bajos. Sin embargo, tales sistemas presentan deficiencias en el sentido de que no son aplicables para todos los objetivos del manejo de las condiciones geotécnicas. Por ejemplo, el sistema RISMAN se presenta como una herramienta para el análisis del riesgo en un momento determinado y no durante todo el proceso de construcción.

De esta forma, en el año 2000 se introduce el concepto de GeoQ, como un esfuerzo para innovar el manejo de las condiciones del terreno, mediante la introducción de la gestión del riesgo de forma cíclica, es decir, durante todas las etapas que comprende el desarrollo

de una obra. Van Staveren (2006) presenta la experiencia obtenida mediante la implementación del sistema GeoQ, así como su aplicación para todo tipo de proyectos de ingeniería civil. Al combinar los conocimientos teóricos del manejo del riesgo junto con la experiencia obtenida mediante su implementación, se ha mejorado en gran medida el marco de trabajo de esta metodología, tal como lo demuestra el sistema GeoQ. Sin embargo, cabe destacar que el proceso de mejoramiento aún no ha finalizado, y que día a día se trata de innovar en la efectividad de este método.

La Asociación Internacional de Túneles (*International Tunneling Association, ITA*) propuso un documento que reúne una serie de lineamientos para el manejo del riesgo en túneles, es decir, una guía para aquellos involucrados en la identificación y gestión de riesgos asociados a obras subterráneas. De esta forma, se trata de dar a conocer el proceso del manejo del riesgo junto con las técnicas existentes que se pueden aplicar en el desarrollo de un proyecto.

El Grupo Internacional de Seguros en Túneles (*International Tunneling Insurance Group, ITIG*) creó un código para la gestión de riesgos en túneles. Su objetivo es promover buenas prácticas con el fin de reducir y manejar los riesgos asociados al diseño y construcción de obras subterráneas, y así llevarlos a un nivel "tan bajo como razonablemente pueda ser" (ALARP, por sus siglas en inglés). Para lograr tal objetivo, se presentan una serie de lineamientos en donde se indican las responsabilidades de los involucrados en el proyecto a través de cada una de sus etapas, de forma que cada uno dirija adecuadamente lo que le corresponde y con las asignaciones financieras apropiadas.

Cabe mencionar que el marco de trabajo para el manejo del riesgo se encuentra en constante desarrollo, con el fin de encontrar mejoras que se adapten a los requerimientos de cada proyecto. De igual forma, los cambios que se implementen se orientan a aumentar la efectividad del proceso y su facilidad de aplicación en cada una de las etapas.

A nivel nacional, se cuenta con bastante experiencia en la construcción de túneles, principalmente debido a los esfuerzos del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). Sin embargo, no existen referencias sobre la aplicación del manejo del riesgo en este tipo de proyectos, lo cual hace que esta metodología sea innovadora y a la vez útil para optimizar los procesos constructivos, tanto para este caso en particular como para proyectos futuros, de manera que se cree una base para propuestas de gestión del riesgo.

## **1.2 Objetivos**

### ***1.2.1 Objetivo General***

- Elaborar un plan de reducción de los riesgos asociados a la etapa de excavación del túnel paralelo de la Planta Hidroeléctrica de Cachí, mediante la aplicación de los conceptos del manejo del riesgo.

### ***1.2.2 Objetivos Específicos***

- Emplear la información suministrada por el ICE en relación con las condiciones geológicas, hidrogeológicas y geotécnicas del proyecto, así como el método constructivo que se utilizará.
- Establecer los riesgos asociados a la etapa de excavación del túnel paralelo.
- Definir de manera cualitativa la probabilidad de ocurrencia y las consecuencias que los riesgos identificados ocasionarían al proyecto en análisis.
- Elaborar una matriz con la probabilidad de ocurrencia y la intensidad de las consecuencias de los riesgos identificados, de forma que asigne una puntuación para cada riesgo y así identificar los críticos del proyecto.
- Definir el plan para el manejo de los riesgos críticos identificados en el proyecto, en donde se establezcan las medidas de mitigación a tomar en cada caso.
- Evaluar la efectividad del plan para el manejo del riesgo y brindar las conclusiones y recomendaciones pertinentes.
- Establecer un medio efectivo para transmitir lo obtenido en este trabajo a lo que será la etapa de construcción, de manera que su aplicación se facilite en el campo.

## **1.3 Delimitación del problema**

### ***1.3.1 Alcance***

- La propuesta se hará para la etapa de construcción del túnel paralelo de la Planta Hidroeléctrica de Cachí, específicamente para la excavación de dicha obra.

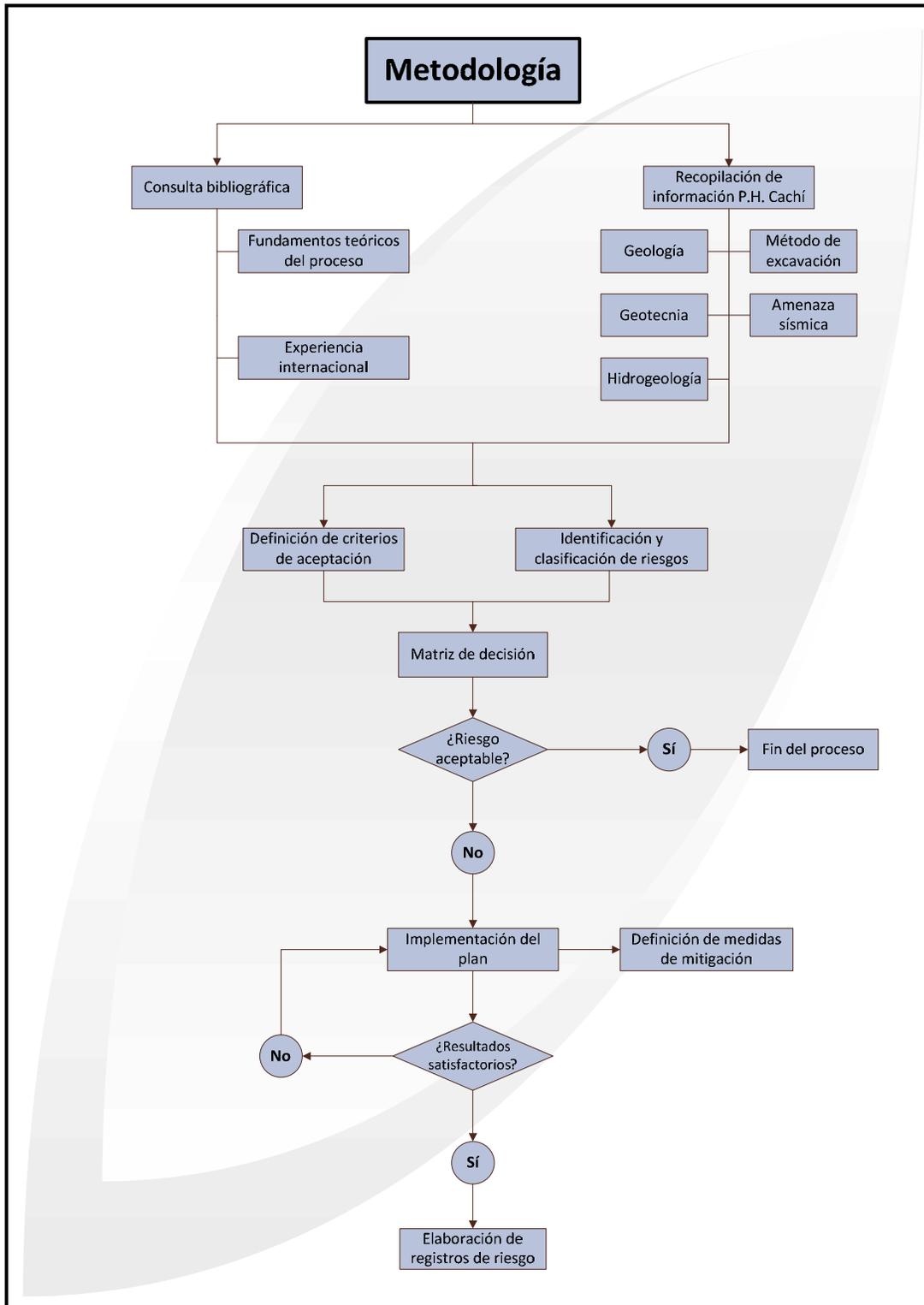
- Los resultados y consideraciones derivados del análisis a realizar, serán únicamente para el túnel paralelo de la Planta Hidroeléctrica de Cachí, por tanto, lo obtenido no es aplicable a otras obras del proyecto o a otros trabajos de este tipo. No obstante, se busca establecer un procedimiento que sirva de guía para futuros trabajos similares.
- El proyecto se enfoca exclusivamente al manejo de los riesgos de tipo geológico y geotécnico. Los referentes al aspecto ambiental, legal o de cualquier otro tipo, se encuentran excluidos de este análisis.
- El trabajo consiste en una evaluación cualitativa de los posibles riesgos geológico – geotécnicos asociados a la excavación del nuevo túnel.
- El proceso a realizar no pretende eliminar por completo la existencia de los riesgos asociados al proyecto, sino más bien llevar a cabo un adecuado manejo de los mismos.
- El análisis financiero de los riesgos identificados se encuentra fuera del alcance de este trabajo.

### ***1.3.2 Limitaciones***

- Las características geológico-geotécnicas del macizo se determinarán a partir de la información existente. No se harán muestreos adicionales para ampliar tal información.
- Debido a la variabilidad típica de los materiales a lo largo de líneas de túnel, las propiedades geológicas y geotécnicas empleadas en el análisis a realizar, podrán variar al momento de la excavación.

## **1.4 Marco metodológico**

La Figura 1.4 muestra la metodología a seguir para la elaboración del presente trabajo.



**Figura 1.4**  
Metodología propuesta para el desarrollo del trabajo

### **1.4.1 Marco teórico**

Esta fase se refiere a la búsqueda y recopilación de la información disponible para la ejecución del proyecto propuesto. Primeramente reúne la investigación sobre los fundamentos teóricos del manejo del riesgo, es decir, las etapas que comprende así como los conceptos que sustentan cada una de estas etapas.

De igual forma, se realiza la consulta bibliográfica de la experiencia internacional con la implementación del manejo del riesgo, para así verificar la aplicabilidad de estos conceptos al área geotécnica o hacer los ajustes del caso para que pueda utilizarse.

De manera paralela a lo descrito con anterioridad, se recopila información referente al proyecto de ampliación de la Planta Hidroeléctrica de Cachí. Específicamente, la búsqueda de información se orienta a aspectos geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos de la nueva estructura, así como el método de excavación que se utilizará y la amenaza sísmica bajo la cual se encuentra el lugar. Todo esto se hará con el fin de caracterizar el macizo rocoso que atravesará el túnel y así aplicar los conceptos del manejo del riesgo durante su excavación.

### **1.4.2 Identificación y clasificación de riesgos**

A partir de la caracterización del macizo a lo largo de la línea de túnel, es posible identificar los riesgos que pueden afectar el correcto desarrollo de su excavación. Una vez detectados, se procede a asignar cualitativamente una probabilidad de ocurrencia a cada riesgo. Además, es necesario realizar una cuantificación de los riesgos, es decir, determinar las consecuencias que estos generarían en caso de suceder.

Se procede a definir la matriz de decisión, la cual incluye los riesgos identificados junto con su probabilidad de ocurrencia y consecuencias, mostradas a través de una puntuación asignada previamente. Con base en estas puntuaciones y los criterios de aceptación establecidos, se procederá a definir si los riesgos identificados son aceptables o no. En caso de ser aceptables, se da por finalizado el proceso y los riesgos se excluyen de análisis posteriores; caso contrario, se prosigue con la siguiente fase del trabajo.

### ***1.4.3 Implementación del plan para el manejo del riesgo***

Para los riesgos considerados como inaceptables, es necesario definir medidas de mitigación orientadas hacia un plan para el manejo de los mismos. Es así como se proponen acciones con el fin de reducir la probabilidad de ocurrencia y/o minimizar las consecuencias asociadas a tales riesgos.

Es necesario verificar que las medidas tomadas efectivamente disminuyen los riesgos y permiten optimizar la construcción del túnel. Se hará una comparación entre las condiciones iniciales del proyecto y los resultados obtenidos con la implementación del manejo del riesgo. En caso de que los resultados no sean favorables, se deberá hacer una revisión de las medidas de mitigación tomadas hasta encontrar una solución óptima.

Como producto de este proyecto de graduación, se propone la elaboración de registros de riesgo que permitan la fácil aplicación e interpretación de esta metodología en el campo.

## - Capítulo 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MANEJO DEL RIESGO

---

Con el fin de establecer un marco de referencia para el proyecto a desarrollar, se definen los siguientes conceptos:

- *Condiciones geotécnicas*: aspectos relacionados con la naturaleza, forma, composición y estructura del macizo y el agua presente en él. Se trata de condiciones derivadas de la investigación previamente realizada, sin embargo, su establecimiento no es definitivo y las condiciones pueden variar al momento de la construcción.
- *Incertidumbre*: grado de desconocimiento o falta de información sobre un aspecto en particular, en este caso, las condiciones geotécnicas presentes en un proyecto determinado.
- *Peligro*: evento o situación que tiene el potencial de crear un impacto en diversos aspectos de un proyecto. Tales aspectos pueden estar relacionados con costos, programación, diseño, construcción, entre otros.
- *Probabilidad*: frecuencia con la que se puede producir un suceso o resultado específico.
- *Riesgo*: producto de la probabilidad de ocurrencia de un evento indeseado y las posibles consecuencias que se derivan de tal evento.

Ahora, se define el manejo del riesgo como el proceso integral de identificar peligros, evaluar su probabilidad de ocurrencia y consecuencias, e implementar las medidas de mitigación necesarias para prevenir o reducir tales riesgos. Se trata de un proceso global de valoración del riesgo para la reducción y control del mismo.

De forma general, el manejo del riesgo contempla los siguientes pasos:

1. Identificación de riesgos.
2. Evaluación de la probabilidad de ocurrencia y potenciales consecuencias.
3. Implementación de cambios o medidas para la reducción del riesgo.
4. Control del riesgo residual.

Según se indicó en el capítulo anterior, existen diversas metodologías para la aplicación del manejo del riesgo. Para este proyecto en particular se ha decidido trabajar bajo la metodología del GeoQ. Al aplicar este sistema durante la etapa de diseño, se pretende que el nuevo túnel esté listo para su construcción con un perfil de riesgos definido y aceptable.

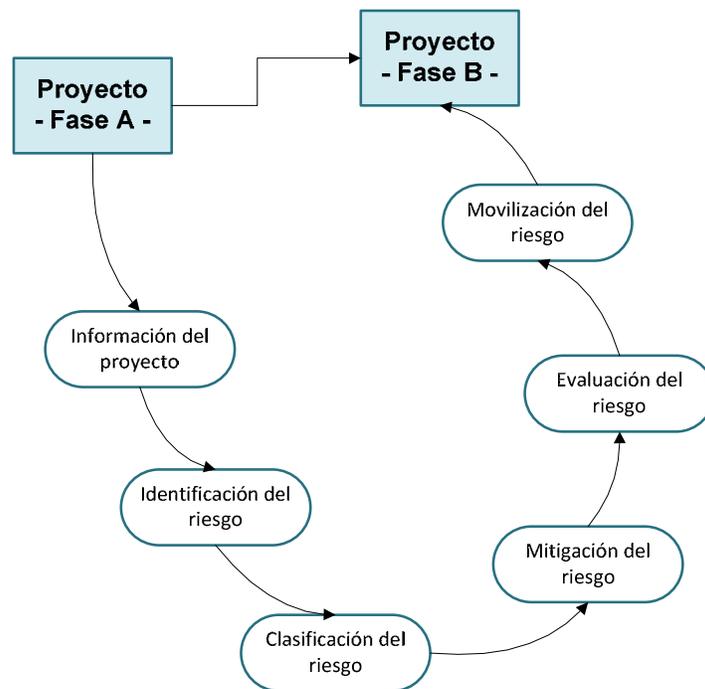
GeoQ (donde Q indica calidad, *quality*) es una metodología que comprende los principales conceptos del manejo del riesgo a través de todas las etapas de un proyecto. Se trata de un proceso cíclico de la gestión del riesgo, para así lograr la calidad de las obras que se lleven a cabo, y que además éstas se realicen dentro del presupuesto y tiempo determinados.

La efectividad del GeoQ radica en que puede ser aplicado en cualquier tipo de proyecto, independientemente de las condiciones del terreno que se tengan. Además, su intención es suplir los requerimientos de todas las partes interesadas de un proyecto, como por ejemplo el cliente, contratista y terceros. Según van Staveren (2006), se ha comprobado que la aplicación de este proceso reduce los riesgos relacionados con las condiciones del suelo a niveles aceptables, generando beneficios en diversos ámbitos.

Como se mencionó anteriormente, GeoQ es un proceso cíclico, es decir, propone la implementación de seis pasos en cada una de las etapas de un proyecto. Tales pasos son:

1. Información del proyecto
2. Identificación del riesgo
3. Clasificación del riesgo
4. Mitigación del riesgo
5. Evaluación del riesgo
6. Movilización del riesgo

Estos pasos se muestran en la Figura 2.1 y se describen en los apartados siguientes.



**Figura 2.1**

Los seis pasos cíclicos del GeoQ

Fuente: van Staveren, 2006

## 2.1 Información del proyecto

El proceso inicia con la recolección de toda la información relevante, tanto del proyecto en general como las relacionadas con las condiciones geotécnicas en particular. Es importante que en esta etapa se definan claramente los objetivos del proyecto, con el fin de tener claras las bases para las próximas fases del proceso.

Se aclara que el riesgo puede deberse a condiciones geológicas desfavorables, diseño inapropiado o mala ejecución, por tal motivo se resalta la importancia de conocer la mayor cantidad de información posible sobre el proyecto.

## 2.2 Identificación del riesgo

Consiste en prever la mayor cantidad de riesgos que pueden afectar el proyecto en análisis. Se debe prestar especial atención a esta fase, debido a que la misma define el éxito de las etapas posteriores. Existen diversas herramientas para la identificación de riesgos, entre ellas se mencionan las siguientes:

- Estudio de literatura existente. Comprende la revisión de la información disponible, tanto nacional como internacional, sobre riesgos durante la excavación de túneles.
- Escenarios de análisis. Consiste en plantear situaciones futuras con base en la pregunta "¿qué pasaría si...?".
- Listas de verificación. Son listas en las que se enumeran una serie de riesgos relacionados con alguna condición en particular, por ejemplo excavación en roca o en suelos blandos. Para este caso se emplean listas existentes en la literatura internacional.

### 2.3 Clasificación del riesgo

En esta etapa se define la severidad de los riesgos identificados, en términos de su probabilidad de ocurrencia y el efecto de las consecuencias que generan. Se utilizará un método semi-cualitativo para la clasificación del riesgo (van Staveren, 2006), el cual consiste en la asignación de puntuaciones a cada riesgo. Lo anterior resulta de multiplicar la puntuación de la probabilidad por la puntuación de la consecuencia.

Con base en las puntuaciones asignadas a cada riesgo, se establece una matriz de decisión, la cual recopila en forma gráfica lo descrito anteriormente y permite visualizar los riesgos que se consideren críticos para el proyecto. Un ejemplo de esta matriz se presenta en la Figura 2.2.

		Puntuación de severidad				
		1	2	3	4	5
Puntuación de probabilidad	1	Green	Green	Green	Yellow	Red
	2	Green	Green	Yellow	Yellow	Red
	3	Green	Yellow	Yellow	Red	Red
	4	Yellow	Yellow	Red	Red	Red
	5	Yellow	Red	Red	Red	Red

**Figura 2.2**

Ejemplo de matriz de decisión  
Fuente: Wagner y Knights, 2006

La definición de los riesgos críticos se realiza a partir de los criterios de aceptación establecidos para el proyecto. De esta manera se busca hacer un mayor énfasis en aquellos riesgos que representen los problemas más significativos y así establecer las medidas para su mitigación.

## 2.4 Mitigación del riesgo

Una vez concluidas las etapas anteriores, es necesario tomar acciones para eliminar o controlar los riesgos presentes en el proyecto. Existen diferentes estrategias para la mitigación de riesgos, entre ellas se tienen las siguientes:

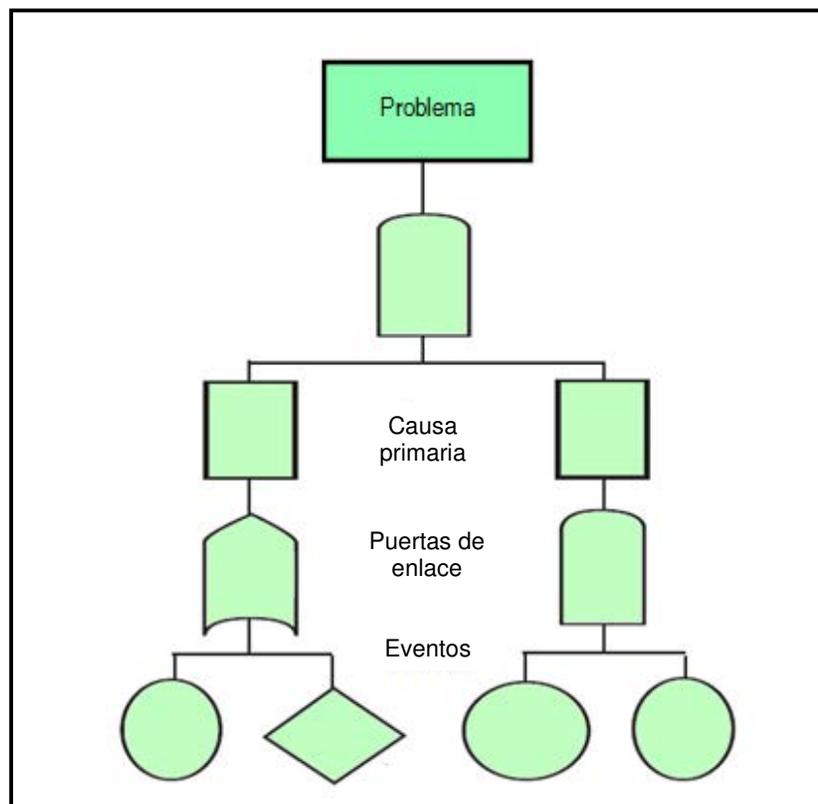
- *Retener el riesgo:* apropiado para aquellos riesgos de baja probabilidad de ocurrencia o efectos menores, ya que consiste en únicamente aceptar la ocurrencia del riesgo, sin tomar alguna medida adicional. De igual forma, puede ser aplicado para los riesgos residuales, es decir, aquellos que resultan de la aplicación de medidas de mitigación.
- *Transferir el riesgo:* como su nombre lo indica, consiste en transferir un riesgo hacia otro responsable, por ejemplo, una compañía de seguros. No se toma ninguna acción adicional, únicamente se trata de buscar la persona o grupo de personas que puedan realizar un mejor manejo del riesgo identificado.
- *Reducir el riesgo:* se relaciona con la reducción de la causa del riesgo, sus efectos, o una combinación de ambas. En este caso, es importante determinar claramente las causas y efectos asociados a un riesgo, a fin de definir cuál de ellos posee un mayor peso y por ende, la medida más apropiada que se debe tomar.
- *Evitar el riesgo:* apropiado para riesgos de alta probabilidad de ocurrencia y efectos serios. Consiste en la eliminación del riesgo a través de medidas ligeramente drásticas, por ejemplo un nuevo diseño o detención del proyecto. Es conveniente cuando las estrategias anteriores representan costos muy elevados.

Para efectos de este proyecto, se aplicará mayormente la estrategia de reducción del riesgo. En este caso, es necesario realizar un análisis de los riesgos encontrados, a fin de establecer claramente las causas que los originan y las consecuencias asociadas.

Para este fin se pueden emplear diversos métodos. En este caso, se utilizarán dos de ellos, uno para determinar las causas que generan un riesgo y otro para definir sus efectos. A continuación se presenta una descripción de ambos métodos:

- **Árbol de análisis de causas (*Fault tree analysis*, FTA):** utilizado para definir las causas que provocan la ocurrencia de un riesgo. Consiste en una representación esquemática de todas las posibles causas, esto debido a que se basa en el concepto de que un riesgo se da por la conjugación de una serie de factores, y no una única causa. En la Figura 2.3 se muestra un ejemplo del diagrama que resulta una vez que se aplica el método.

Según se observa, el resultado es un diagrama que muestra y ordena todas las posibles causas que provocan una situación de riesgo. Es importante realizar una cautelosa identificación de los riesgos, de manera que éstos realmente sean los principales y no una causa de un riesgo mayor.



**Figura 2.3**  
Ejemplo de diagrama de FTA

Se resaltan las diferentes formas o símbolos que se utilizan dentro del diagrama, debido a que cada uno tiene un significado distinto. El detalle de los mismos se muestra en el Cuadro 2.1. Conviene resaltar que existen más símbolos que los mostrados en el siguiente cuadro, sin embargo, el uso de los mismos se relaciona con un análisis más detallado. Se considera que los explicados a continuación son suficientes para lo requerido en el presente trabajo.

**Cuadro 2.1**  
Significado de símbolos empleados en el FTA

Símbolo	Categoría	Significado
	Causa y/o evento	Causa bien definida
	Causa y/o evento	Causa con cierto nivel de incertidumbre debido a falta de información o importancia
	Puerta de enlace <sup>(1)</sup>	Utilizado si todos los eventos se dan de manera simultánea
	Puerta de enlace <sup>(1)</sup>	Utilizado si al menos uno de los eventos ocurre
	Causa	Se forma por la combinación de diversos eventos unidos por una puerta de enlace

<sup>(1)</sup> Se utilizan para agrupar diferentes causas y/o eventos

- **Árbol de consecuencias:** al contrario del FTA, este método se centra en las consecuencias que conlleva la ocurrencia de un riesgo determinado. Consiste en una representación gráfica de todos los posibles efectos que se generan a partir de un evento inicial, en este caso, cada uno de los riesgos que se identifiquen. Una vez identificado el problema central se grafican todos los efectos que éste desencadena, algunos de los cuales podrán estar encadenados y/o dar origen a otras consecuencias.

Una vez realizado el análisis de cada uno de los riesgos, se da paso a encontrar medidas para reducir o evitar tales riesgos, ya sea mediante la reducción de la probabilidad de su ocurrencia o a través de la implementación de medidas que disminuyan su impacto.

Como resultado final de esta etapa se considera la creación de un plan para el manejo del riesgo. En éste se incluyen las medidas y procedimientos que se deben tomar para el control de los riesgos identificados.

## **2.5 Evaluación del riesgo**

En esta etapa se realiza una verificación del proceso realizado hasta el momento. Básicamente, consiste en revisar que el manejo del riesgo aplicado sea realmente efectivo y satisfaga los criterios de aceptación definidos para el proyecto.

Se compone de dos subprocesos. El primero de ellos es una evaluación general del proceso de manejo del riesgo obtenido hasta el momento. Principalmente, abarca los siguientes aspectos:

- Asegurar que todos los posibles riesgos hayan sido identificados y debidamente clasificados.
- Revisar que cada riesgo tenga asociado medidas efectivas para su mitigación.

Posterior a esta revisión, se procede a una evaluación de los resultados esperados con la aplicación de las medidas de mitigación seleccionadas para cada riesgo. Se realiza nuevamente una comparación con los criterios de aceptación definidos para el proyecto, de manera que verdaderamente los riesgos identificados hayan sido llevados a un nivel tolerable gracias a la gestión realizada.

## **2.6 Movilización del riesgo**

En esta fase final se archiva toda la información obtenida durante el manejo del riesgo realizado, para así transferirla a la siguiente etapa del proyecto, en este caso, a la etapa de construcción del túnel. Es importante que la recopilación de la información se realice de forma clara, de manera que su revisión no represente un problema adicional para quienes la utilizarán en la siguiente fase.

En esta etapa, los registros del riesgo se convierten en una herramienta valiosa para supervisar el manejo del riesgo en fases posteriores. En ellos se incluyen tanto los riesgos identificados, como las medidas de mitigación implementadas para controlarlos.

Cabe destacar que el éxito del manejo del riesgo depende de la continua aplicación de los pasos descritos anteriormente a lo largo de todas las etapas del proyecto. La capacidad de conducir los riesgos hasta un nivel tan bajo como razonablemente puede ser no será posible si la gestión del riesgo es implementada sólo en una o algunas fases del proyecto.

**- Capítulo 3 -**  
**MARCO GEOLÓGICO DEL PROYECTO**

---

### **3.1 Geología regional**

La geología del área de influencia del proyecto comprende el sector que abarca el curso medio del Valle del Río Reventazón, desde la desembocadura del Río Macho hasta el sitio conocido como Las Juntas. Se caracteriza por la presencia de rocas sedimentarias, volcánicas e intrusivas (diques y sills) de diferentes edades geológicas y pertenecientes a diferentes Formaciones.

De acuerdo con el informe de factibilidad realizado por el ICE (ICE, 2010), las obras que se planean construir se ubican en la Formación Doán, la cual está conformada por el grupo Guatuso y el grupo Peñas Blancas. El primero corresponde con una secuencia de tobas, tobas lapílicas, brechas y lavas andesíticas de poco espesor; en tanto que el segundo grupo está constituido por brechas volcánicas, tobas duras, diques y sills. En la Figura 3.1 se aprecian algunos de los materiales de la Formación descrita anteriormente.



**Figura 3.1**  
Materiales de la Formación Doán  
Fuente: ICE, 2010

En el mismo informe se indica que las rocas que se localizan en el área de estudio muestran evidencias de fallamientos intensos ocurridos en el pasado, los cuales se notan en las brechas de la Formación Doán. De acuerdo con la información existente, se han definido dos sistemas de fallas predominantes con respecto al túnel: uno longitudinal y

otro transversal, correspondientes a las Fallas Urasca y Guatuso. La primera de ellas presenta una dirección N48°O, en tanto que la Falla Guatuso presenta una dirección N63°O. Éstas se consideran las más importantes por su espesor y porque es probable que a través de ellas y sus zonas de influencia se infiltre el agua al túnel.

Desde el punto de vista geomorfológico, la zona de estudio se caracteriza por presentar unidades litológicas de naturaleza genética similar, lo que hace posible que el desgaste erosional del terreno sea uniforme en cuanto a su magnitud y volumen.

En relación con el relieve de la zona, éste se caracteriza por su irregularidad, en donde las laderas alcanzan pendientes de 35 a 80 grados. Tal aspecto y la alteración físico mecánica de las rocas, favorece la ocurrencia de movimientos de masa, originando deslizamientos muy frecuentes en la zona de trazo de la línea de conducción y la casa de máquinas.

Hacia la parte NE y E se encuentran los deslizamientos activos y en la parte SO y O se localizan los deslizamientos inactivos. Estos deslizamientos no estarán interactuando con las obras a realizar, debido a que la mayor parte de éstas serán subterráneas y las demás obras se encuentran alejadas de los deslizamientos (tubería forzada, tanque de oscilación, presa y casa de máquinas).

### **3.2 Geología local**

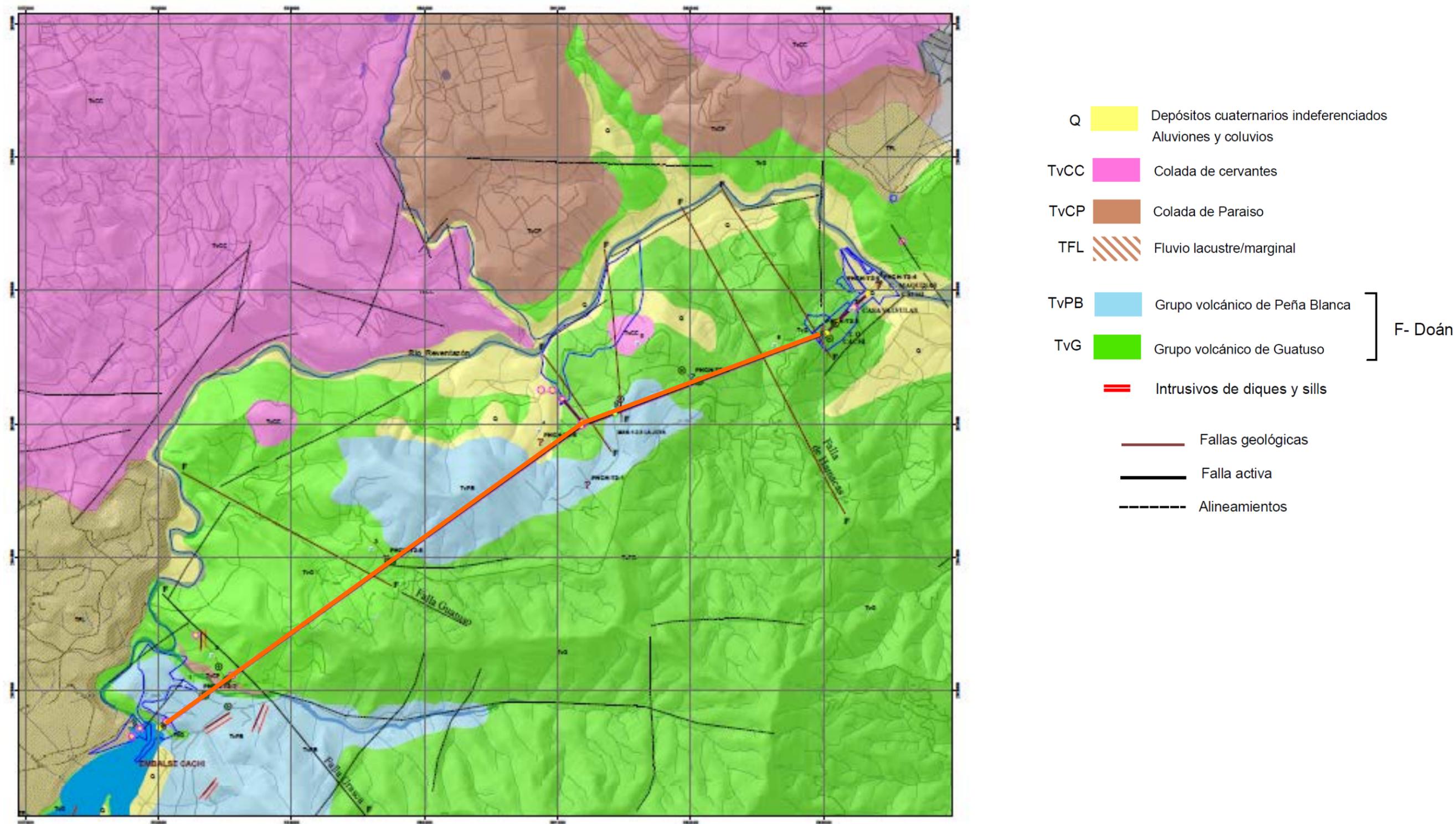
La geología del nuevo túnel puede correlacionarse adecuadamente con la encontrada durante la excavación del túnel existente, debido a que por su cercanía, es de esperar que los materiales sean muy similares y no presenten grandes cambios.

De acuerdo con la documentación del túnel existente (Cervantes y Granados, 2006), la roca atravesada es casi en su totalidad brecha, la cual está compuesta por fragmentos ígneos con tamaños de hasta más de un metro, unidos por una matriz tobácea, con cementación silíceo y de constitución física sana. Tales materiales presentan diferentes grados de alteración, con predominancia de una condición física de moderada a buena; sin embargo, en algunos tramos (al inicio del túnel) las condiciones fueron de regulares a malas, por lo que fue necesario el uso de soporte temporal durante la excavación.

Adicionalmente, se atravesaron diferentes coladas de lavas y capas de tobas con presencia ocasional de bloques de roca; en menor proporción se encontraron materiales formados por aluvión con cierto tipo de cementación y rocas blandas. Además, se tiene la presencia de diques basálticos y andesíticos con espesores variables entre uno y cinco metros, en los que la roca es dura pero que se espera esté fracturada.

Con base en lo mencionado anteriormente, es de esperar que las condiciones geológicas sean de buenas a muy buenas en aproximadamente un 72%, y de regulares a malas en el restante 28%.

En las Figuras 3.2 y 3.3 se muestra con mayor detalle la geología anteriormente descrita. Según se puede observar en la Figura 3.3, el túnel presenta una cobertura variable entre 40 m y 520 m; de manera general, ésta será mayor a 75 m en un 85% del trayecto del nuevo túnel. Debido a lo anterior, no es de esperar cambios importantes en la redistribución de esfuerzos del macizo por la excavación del túnel, ni tampoco excesos de carga litostática. Sin embargo, en aquellos sectores de baja cobertura, menor a 40 m ó 50 m, pueden presentarse filtraciones de agua, principalmente en aquellas zonas donde se presenten planos débiles o fracturamiento intenso con buzamiento hacia el túnel.



**Figura 3.2**  
Geología local de la línea de túnel  
Fuente: ICE, 2010

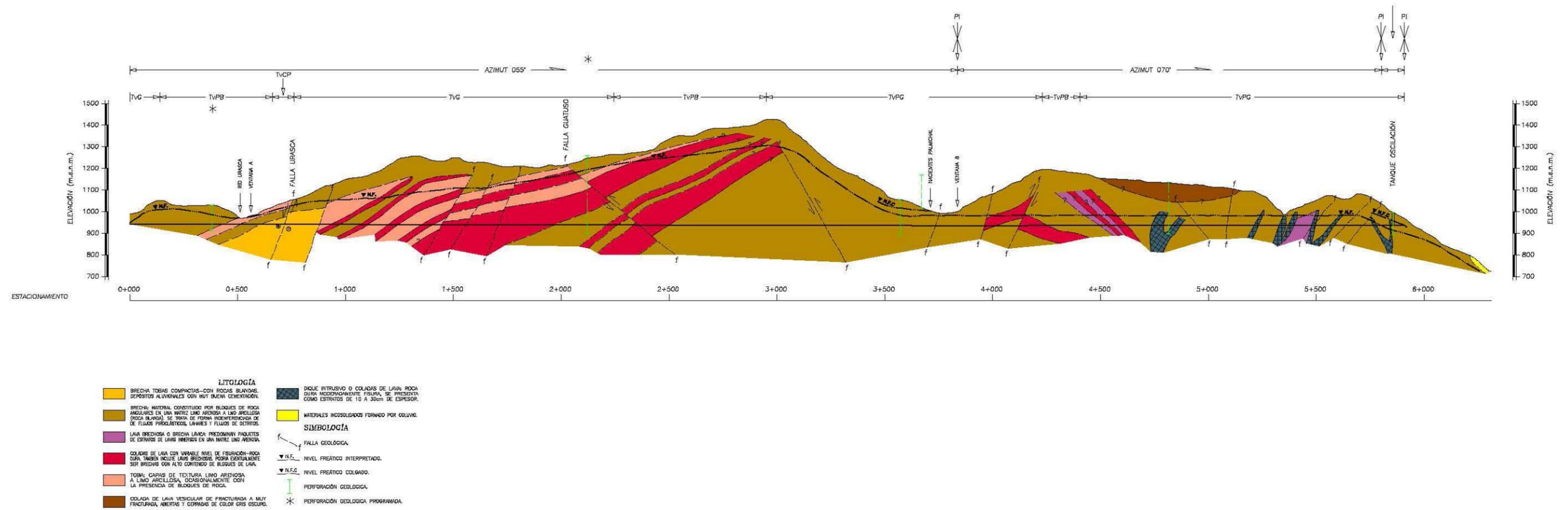


Figura 3.3  
Perfil geológico del túnel  
Fuente: ICE, 2010

### 3.3 Hidrogeología

Según el informe de factibilidad del ICE (ICE, 2010), en la zona de estudio se han cartografiado 60 manantiales, los cuales presentan caudales relativamente pequeños. El nuevo túnel pasará bajo 12 manantiales que eventualmente podrían ser afectados según las condiciones geológicas existentes (existencia de barreras impermeables, acuíferos colgados, entre otros).

El sustrato de los manantiales mencionados corresponde con brechas sanas bien cementadas y de buena calidad físico mecánica, las cuales tienen también lentes de tobas. Probablemente, estos lentes actúan en algunos sectores como sellos, permitiendo la formación de acuíferos colgados. Al contrario, la existencia de sectores meteorizados permite la filtración del agua, lo que podría ocasionar problemas no sólo durante la construcción de la obra, sino también por abatimiento de los acuíferos existentes.

Cabe destacar que durante la excavación del túnel existente se dieron pocas filtraciones (Cervantes y Granados, 2006), desde goteos leves hasta algunos pocos casos de chorros de agua, por lo que podrían esperarse las mismas condiciones para el nuevo túnel. Sin embargo, para el desarrollo de la Central Hidroeléctrica La Joya, cercana al área de influencia geológica de la Planta Hidroeléctrica Cachí, las condiciones hidrogeológicas no fueron tan favorables, ya que las filtraciones dificultaron el proceso de excavación y además se afectaron acuíferos utilizados por poblaciones aledañas (ICE, 2010).

En relación con el nivel freático, de acuerdo con la información de las perforaciones realizadas por personal del ICE, se señala que éste se encuentra entre 40 m a 45 m sobre el techo del túnel propuesto, lo que resulta en una recarga que oscila entre 0,40 MPa y 0,50 MPa. Según el perfil geológico de la Figura 3.3, se estima que el nivel se mantiene por encima del túnel a lo largo de todo su trayecto (entre 30 m y 360 m), excepto en las cercanías del tanque de oscilación, donde decrece aproximadamente a 30 m por debajo del nivel del túnel.

### 3.4 Amenaza sísmica

El proyecto se encuentra localizado en un área sísmicamente activa y localmente caracterizada por la existencia de fallas activas y potencialmente activas, las cuales, inclusive, cortan el trazo del túnel (ICE, 2010). De ellas, las más importantes a considerar en las cercanías de la nueva conducción son las siguientes:

- *Sistema de Fallas Navarro:* consiste en una serie de fallas de rumbo NE y longitud total de 54 km. A este sistema se le estima un potencial sísmico para generar sismos máximos con magnitudes  $M_w$  entre 5,3 y 6,7. Dentro de este conjunto de fallas, las que presentan una mayor influencia en el túnel, debido a su cercanía, son las Fallas Navarro y Santiago.
  - Falla Navarro: falla activa con una zona de falla de al menos 50 m de ancho. Su traza superficial se encuentra aproximadamente a 2,5 km del sitio de toma del túnel.
  - Falla Santiago: se reconoce por el valle lineal en un tramo del río Reventazón, justo a unos 2 km al norte de la línea de túnel.
- *Sistema de Fallas Atirro – Río Sucio:* consiste en una serie de fallas de rumbo predominantemente NO. Se estima que estas fallas pueden generar sismos con magnitudes que oscilan entre 4,8 y 6,8  $M_w$ .
- *Falla Campano:* la falla consiste en una serie de lineamientos con expresión de moderada a prominente, que se extienden una longitud de 15,0 km. Su rumbo varía entre N20°O y N80°O. Se estima que podría generar un sismo máximo de 6,4  $M_w$ . Los alineamientos N20-30°O al sur del río Reventazón, cruzan la traza del túnel entre la ventana B y el tanque de oscilación.
- *Falla Tucurrique:* transcurre a una distancia ligeramente menor que 3,0 km de la casa de máquinas. El rumbo de la falla es N30°O en el extremo norte y N60°O en el extremo sur. Tomando en cuenta su longitud, esta falla podría generar un sismo máximo de 6,6  $M_w$ .
- *Falla Doán:* tiene un rumbo NNO a NO y una longitud aproximada de 7,0 km. La proyección en superficie de la traza de esta falla, indica que puede estar cortando la línea de túnel en las cercanías de la Ventana A.

Se resalta que los daños asociados con la ocurrencia de un evento sísmico serán el resultado de los efectos directos del cruce de una falla activa a través de las obras del túnel, o más probablemente debido a los efectos de la sacudida sísmica del suelo (propagación de las ondas sísmicas).

## - Capítulo 4 - CONDICIONES GEOTÉCNICAS A LO LARGO DEL TÚNEL

---

Según fue anotado en el Capítulo 3, la litología que atravesará el nuevo túnel corresponde con rocas volcánicas de la Formación Doán, siendo las brechas y las lavas los materiales predominantes. La caracterización geotécnica a la que se hace referencia en este capítulo es únicamente de tales materiales, por ser los más representativos de las rocas a excavar.

De acuerdo con el modelo geológico del nuevo túnel (Figura 3.3), se estima que a lo largo de la conducción el porcentaje de brechas será de 61,3% y el de lavas 21%; el porcentaje restante (17,7%) corresponde a otros materiales como tobas y aluviones cementados. El Cuadro 4.1 muestra los porcentajes estimados de las rocas a excavar.

**Cuadro 4.1**  
Porcentajes estimados de roca a excavar

<b>Tipo de material</b>	<b>Porcentaje estimado</b>
Brechas	61,3
Lava brechosa y coladas de lava	21,0
Tobas	5,4
Aluviones cementados	3,3
Diques intrusivos	3,0
Relleno de falla	6,0

Fuente: ICE, 2010

Durante la excavación del túnel actual, el macizo rocoso presentó un buen comportamiento: en un 70% no fue necesaria la colocación de soporte provisional, en tanto que en el restante 30% se utilizaron arcos de acero con separación variable entre 0,7 m y 1,5 m. En general los materiales, aunque fueron de baja resistencia, se encontraron poco afectados por sistemas de fracturas y éstas fueron limpias y sin señas de cizallamiento.

Para mejorar el conocimiento de los materiales presentes en el sitio, el ICE ha realizado siete sondeos exploratorios de profundidad variable entre 30,0 m y 245,0 m. En las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3 se observan algunas de las muestras obtenidas de tales perforaciones.



**Figura 4.1**  
Perforación PHCHT2-1, de 132,60 m a 138,90 m  
Fuente: ICE, 2010



**Figura 4.2**  
Perforación PHCHT2-2, de 209,70 m a 216,85 m  
Fuente: ICE, 2010



**Figura 4.3**  
Perforación PHCHT2-6, de 140,0 m a 156,50 m  
Fuente: ICE, 2010

Según se observa, se trata de materiales relativamente poco fracturados, con fracturación intensa sólo en algunos tramos. No hay evidencia de una meteorización significativa. De manera general, para las lavas se obtuvieron porcentajes de RQD variables entre 0% y 95%; en cuanto a las brechas, los porcentajes variaron entre 0% y 98%.

#### **4.1 Propiedades físicas y mecánicas de la roca intacta**

En este apartado se hace referencia a las siguientes propiedades:

- *Resistencia a la compresión simple (RCS)*: con base en ensayos realizados por el ICE, el valor de esta propiedad varió mayoritariamente entre 16,0 MPa y 41,0 MPa, lo que da un promedio de 20,2 MPa. De acuerdo con estos resultados y la clasificación sugerida por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM por sus siglas en inglés), la matriz rocosa se clasifica como blanda a moderadamente dura (ver Cuadro 4.2).

**Cuadro 4.2**  
Clasificación con base en la resistencia de la roca

Clase	Descripción	Identificación de campo	Resistencia a la compresión simple (MPa)
R <sub>0</sub>	Roca extremadamente blanda	Se puede marcar con la uña.	0,25 – 1,0
R <sub>1</sub>	Roca muy blanda	Al golpear con la punta del martillo la roca se desmenuza. Con navaja se talla fácilmente.	1,0 – 5,0
R <sub>2</sub>	Roca blanda	Al golpear con la punta del martillo se producen ligeras marcas. Con la navaja se talla con dificultad.	5,0 – 25,0
R <sub>3</sub>	Roca moderadamente dura	Con un golpe fuerte del martillo puede fracturarse. Con la navaja no puede tallarse.	25,0 – 50,0
R <sub>4</sub>	Roca dura	Se requiere más de un golpe del martillo para fracturarla.	50,0 – 100
R <sub>5</sub>	Roca muy dura	Se requieren muchos golpes del martillo para fracturarla.	100 – 250
R <sub>6</sub>	Roca extremadamente dura	Al golpear con el martillo sólo saltan esquirlas.	> 250

Fuente: ISRM, 1979

- *Dureza*: a partir de los valores de RCS se puede obtener la razón de dureza ( $f$ ) y clasificar los materiales con base en la escala de Protodyakonov<sup>1</sup>. El Cuadro 4.3 muestra tal clasificación.

**Cuadro 4.3**  
Clasificación por dureza de las rocas del nuevo túnel

Rango de variación de RCS (MPa)	Clasificación de Protodyakonov		
	Categoría	Nivel de dureza	Razón de dureza ( $f$ )
16,0 a 40,0	VIa - V	Mayoritariamente blanda a moderada	1,6 a 4
40,0 a 80,0	V - IIIa	Moderada a dura	4 a 8

Fuente: ICE, 2010

<sup>1</sup> Escala comparativa entre la resistencia de la roca a ser quebrada y perforada con el ensayo de trituración y la razón de dureza de la roca.

- *Velocidad de onda ( $v_p$ ):* como parte de la caracterización de la matriz rocosa llevada a cabo por el ICE, se realizaron 31 ensayos de medición de la velocidad de onda  $p$  en diferentes testigos de roca. Los valores obtenidos variaron entre 1947 m/s y 4989 m/s, lo que da un promedio de 3474 m/s. Se considera que estos valores son bajos y probablemente se relacionan con microfisuras presentes en las rocas ensayadas.
- *Densidad seca:* los valores varían entre 1,87 kN/m<sup>3</sup> y 2,58 kN/m<sup>3</sup>, con un promedio de 2,22 kN/m<sup>3</sup>.
- *Abrasión:* a partir de un ensayo de abrasión de Los Ángeles, se obtuvo una pérdida de 48% de peso de la muestra luego de realizado el ensayo, lo cual evidencia la baja resistencia a la abrasión de los materiales. Esto correlaciona adecuadamente con la ausencia de cuarzo en estas rocas, según se determinó en los ensayos petrográficos realizados por el ICE.

## **4.2 Caracterización geomecánica**

En este apartado se hace referencia a dos parámetros en particular: la deformabilidad y la resistencia al corte del macizo rocoso.

### **4.2.1 Deformabilidad**

Durante la excavación del primer túnel se llevaron a cabo ensayos de placa rígida en los primeros 2,0 km para obtener los módulos de deformación de la roca. Los resultados obtenidos se indican en el Cuadro 4.4.

**Cuadro 4.4**  
Resultados de ensayos de placa rígida

Ensayo	Estación	Placa superior (kg/cm <sup>2</sup> )	Placa inferior (kg/cm <sup>2</sup> )	Placa derecha (kg/cm <sup>2</sup> )	Placa izquierda (kg/cm <sup>2</sup> )	Tipo de roca
1	0+388	127 700	170 900	188 000	61 400	Brecha tobácea, muy diaclasada
2	0+568	33 600	28 900	--	--	Brecha levemente diaclasada
3	0+987,92	--	--	12 829	39 773	Lava fisurada, brechosa
4	2+287,92	--	--	51 250	23 610	Brecha muy fracturada

Fuente: Cervantes y Granados, 2006

Según se observa, existe mucha dispersión en los valores obtenidos, lo cual puede correlacionarse con la variabilidad de litologías existentes y sus condiciones geomecánicas.

De igual manera, durante la construcción del primer túnel se realizaron ensayos *in situ* sobre las brechas en el sitio de presa. Los valores obtenidos se muestran en los Cuadros 4.5 y 4.6.

**Cuadro 4.5**  
Módulos elásticos medios medidos en las paredes de las galerías de investigación

Cámara No.	Pared izquierda		Pared derecha	
	Elástico (kg/cm <sup>2</sup> )	Del macizo (kg/cm <sup>2</sup> )	Elástico (kg/cm <sup>2</sup> )	Del macizo (kg/cm <sup>2</sup> )
1	25 900	24 371	30 490	29 062
2	24 677	23 759	18 049	17 335
3	57 206	54 045	108 804	103 297
4	39 565	38 137	22 230	20 802
5	55 677	51 598	124 507	115 432

Fuente: ICE, 2010  
Modificado por: Marín, 2012

**Cuadro 4.6**

Módulos elásticos medios medidos en la corona y piso de las galerías de investigación

Cámara No.	Superior		Inferior	
	Elástico (kg/cm <sup>2</sup> )	Del macizo (kg/cm <sup>2</sup> )	Elástico (kg/cm <sup>2</sup> )	Del macizo (kg/cm <sup>2</sup> )
1	40 483	35 384	57 308	50 680
5	104 215	89 531	217 200	181 815

Fuente: ICE, 2010  
Modificado por: Marín, 2012

Conviene mencionar que para el diseño del revestimiento del túnel existente, se utilizaron cuatro grupos de valores de módulos de elasticidad, asignados a cada sección del túnel de acuerdo con la calidad de la roca presente. Dicha valoración se muestra en el Cuadro 4.7, así como su porcentaje de utilización a lo largo del túnel.

**Cuadro 4.7**

Módulos de elasticidad utilizados en el túnel existente

Sección	Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )	Material asociado	Porcentaje de utilización (%)
1	41 000 ó más	Roca sana	46,40
2	25 000 – 41 000	Roca de calidad intermedia	37,10
3	20 000 – 25 000	Roca de calidad regular	10,97
4	16 000 – 20 000	Roca de mala calidad	5,52

Fuente: Cervantes y Granados, 2006

#### 4.2.2 Resistencia al corte del macizo rocoso

De acuerdo con el informe de factibilidad del ICE, la resistencia al corte del macizo rocoso ha sido obtenida a partir de la aplicación de un criterio de ruptura empírico (Hoek & Brown, 2002), el cual puede ser expresado por la ecuación siguiente:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (4-1)$$

Donde:

$\sigma'_1$  y  $\sigma'_3$ : esfuerzos principales mayor y menor a la falla.

$\sigma_c$ : resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta.

$m_b$ ,  $a$  y  $s$ : constantes del material que pueden ser obtenidas como sigue:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (4-2)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (4-3)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right) \quad (4-4)$$

$D$  es un factor que depende del grado de alteración al que la roca se ve sometida por el proceso de excavación y relajamiento de esfuerzos, por lo que se define considerando el procedimiento de excavación que se empleará cuando se corta el material. En este caso, considerando lo mostrado en la Figura 4.4, el valor del parámetro  $D$  empleado es de 0, el cual corresponde con una excavación realizada mediante medios mecánicos (rozadora) y voladuras controladas.

Apariencia del macizo rocoso	Descripción del macizo rocoso	Valor $D$ sugerido
	Excelente calidad de voladura controlada o excavación con tuneladora, TBM, con resultados de alteración mínima del macizo rocoso confinado circundante al túnel	$D = 0$
	Excavación mecánica o manual en macizos rocosos de mala calidad (sin voladuras) con una alteración mínima en el macizo rocoso circundante.  Cuando aparezcan problemas de deformación en el piso durante el avance, la alteración puede ser severa a menos que se coloque una contrabóveda temporal, tal como se muestra en la fotografía.	$D = 0$  $D = 0.5$ No invert
	Voladura de muy mala calidad en un túnel en roca competente con daños locales severos, extendiéndose 2 o 3 m en el macizo rocoso circundante.	$D = 0.8$

**Figura 4.4**

Valores del parámetro  $D$  del criterio de Hoek & Brown

Fuente: Hoek & Brown, 2002

Con base en el perfil geológico del túnel, se pueden esperar varias clases de macizos, las cuales, de acuerdo con el sistema de clasificación *Rock Mass Rating* (RMR), van desde la clase II hasta la clase V. Tomando esto en consideración, en el Cuadro 4.8 se muestran los parámetros de entrada para el criterio de ruptura.

**Cuadro 4.8**

Parámetros de entrada al criterio de ruptura de acuerdo con la clase de macizo rocoso

Clase de macizo rocoso	Parámetros de entrada				
	GSI <sup>(1)</sup>	$\sigma_{ci}$ (MPa)	$m_i$ <sup>(2)</sup>	D	Densidad (kN/m <sup>3</sup> )
II	65	30	20	0	23
III	55	20			
IV	40	15			
V	20	15			19

<sup>(1)</sup> Geological Strength Index (índice geológico de resistencia)

<sup>(2)</sup> Constante de la roca intacta

Fuente: ICE, 2010

A partir de lo mostrado en el cuadro anterior y utilizando las ecuaciones (4-2), (4-3) y (4-4), se obtienen los parámetros de salida del criterio de ruptura, los cuales se muestran en el Cuadro 4.9.

**Cuadro 4.9**

Parámetros de salida del criterio de ruptura de acuerdo con la clase de macizo rocoso

Criterio de ruptura de Hoek & Brown				
Parámetro	Clase II	Clase III	Clase IV	Clase V
$m_b$	5,73	3,35	2,35	1,15
s	0,0205	0,0039	0,0013	0,0001
a	0,502	0,506	0,511	0,544
Cohesión aparente (kPa)	1200	800	600	250
Ángulo de fricción (°)	49	42	37	24
Módulo de deformación del macizo (MPa)	5500	1780	1000	300

Fuente: ICE, 2010

Los valores de módulo de deformación mostrados en el cuadro anterior fueron obtenidos a partir de la siguiente expresión para macizos rocosos con  $\sigma_{ci} < 100$  MPa (Hoek & Brown, 2002):

$$E_m (GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}} \quad (4-5)$$

Conviene mencionar que los valores de módulo de deformación para las clases de roca IV y V han sido sugeridas por el informe de TunnelConsult (Della, 2009).

### 4.3 Método de excavación

Según se ha anotado anteriormente, la separación entre ambos túneles oscilará entre 30,0 m y 50,0 m, motivo por el cual debe garantizarse que la excavación del nuevo túnel no afecte la operación del túnel existente, ni de la Planta en general. Debido a lo anterior, se ha considerado el uso de una rozadora (*roadheader*), método que permitiría disminuir el uso de explosivos para la excavación de la nueva conducción, disminuyendo o eliminando cualquier influencia sobre el túnel existente, en virtud de las vibraciones y/o daños que podrían presentarse por el uso de los explosivos.

El equipo propuesto consiste en un brazo armado con una cabeza rotatoria equipada con herramientas de corte (picas) que golpean a fuerte velocidad el frente, desprendiendo el material. El material excavado es recogido por medio de barredoras frontales que lo envían, por medio de una cinta transportadora, a un camión o a un vagón. La máquina se mueve sobre orugas, pero puede desplazarse sobre vías con la misma facilidad.

Entre las ventajas que presenta el uso de esta máquina, se mencionan las siguientes:

- Avance continuo con mejores y mayores rendimientos.
- Se adaptan fácilmente a diferentes secciones de excavación.
- Ausencia de vibraciones.
- Menor afectación de la roca remanente debido a que no es agrietada por voladuras.
- Reutilización en otras obras de túneles del ICE para un larga y completa amortización.

Posibles desventajas:

- No evita la necesidad del jumbo en el caso que sea necesario llevar a cabo tratamientos del terreno en avance.
- Puede generarse mucho polvo durante los trabajos de excavación.

En general, este tipo de equipos no es apto para materiales duros ( $RCS > 80$  MPa) y abrasivos (alto contenido en cuarzo), características que no se presentan en el túnel de Cachí. Con base en las condiciones geomecánicas de la roca que atravesará el nuevo túnel, se ha determinado el uso de una rozadora MT360, con un peso de 60 toneladas y una potencia de la cabeza de alrededor de 200 kW. En la Figura 4.5 se muestra el equipo que se utilizará.



**Figura 4.5**  
Rozadora MT360 de 200 kW  
Fuente: Jiménez, 2012

La cabeza de corte seleccionada corresponde con una de eje transversal (*ripping*), tal como se muestra en la Figura 4.6. En ella, las cabezas giran alrededor de un eje paralelo al frente de excavación, con una velocidad variable entre 45 RPM y 100 RPM. El par de corte es proporcionado por el motor que acciona la cabeza de corte. La fuerza horizontal se ejerce con el giro del brazo y la fuerza vertical con el peso de la rozadora.



**Figura 4.6**  
Cabeza de corte de eje transversal  
Fuente: Jiménez, 2012

A partir de ensayos realizados para la factibilidad de uso de la rozadora, se determinó que las lavas sanas (1100 m de túnel) deben excavarse con el método convencional de barrenación y voladura, mientras que las brechas (aproximadamente 4900 m de túnel) sí pueden ser cortadas con las picas de la rozadora.

Para la excavación del túnel se han previsto cuatro frentes de excavación, haciendo uso de dos ventanas existentes (A y B). En el Cuadro 4.10 se muestran los frentes definidos para este proceso, junto con el método a utilizar en cada caso.

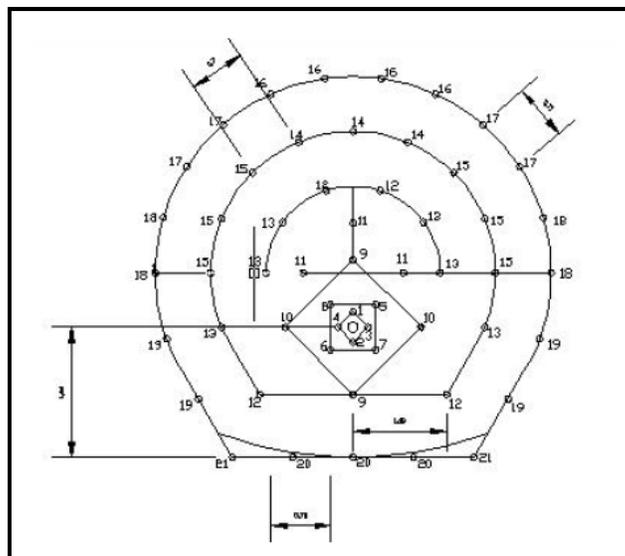
**Cuadro 4.10**  
Frentes de excavación

Identificación	Descripción	Estaciones	Método de excavación
T1 – B2	De la Ventana A hacia la toma de aguas	0+924 a 0+030	Rozadora
T2 – B1	De la Ventana A hacia la Ventana B	0+924 a 2+400	Rozadora
T2 – B2	De la Ventana B hacia la Ventana A	4+000 a 2+400	Perforación y voladura
T3 – B1	De la Ventana B hacia el fin del túnel	4+000 a 6+057	Rozadora

Fuente: ICE, 2010

En vista de que la rozadora es un procedimiento de excavación nuevo para el ICE, es conveniente mantener dos equipos distintos para este fin, y así ganar flexibilidad ante cualquier imprevisto. Por tal motivo, se ha incorporado el procedimiento tradicional de perforación y voladura en uno de los frentes, así como la disponibilidad de equipo ante la eventualidad de requerir el apoyo con este método en los otros frentes.

Para el proceso de voladura se ha diseñado preliminarmente la plantilla que se muestra en la Figura 4.7. Se estaría utilizando emulsión o gel acuoso con velocidad mínima de 5000 m/s y fulminantes no eléctricos.



**Figura 4.7**  
Plantilla de voladura para el nuevo túnel  
Fuente: ICE, 2010

## - Capítulo 5 - **IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE RIESGOS**

---

Con base en la caracterización realizada en los Capítulos 3 y 4, se presenta la identificación de los riesgos asociados a la excavación del túnel y su respectiva clasificación, de acuerdo con los criterios de aceptación definidos para esta fase del proyecto.

### **5.1 Identificación de riesgos**

Los factores condicionantes del proyecto, combinados con el hecho que la construcción y explotación de los túneles está frecuentemente asociada con riesgos importantes, conllevan a la necesidad de realizar un detallado análisis de los riesgos de tipo geológico y geotécnico involucrados en la ejecución del nuevo túnel de conducción, y así identificar de manera temprana los riesgos existentes e implementar a las medidas mitigatorias correspondientes.

En este apartado se presentan los riesgos asociados a la etapa de excavación del nuevo túnel, los cuales han sido definidos con base en la caracterización realizada en los Capítulos 3 y 4.

Preliminarmente, se ha realizado una búsqueda exhaustiva de los posibles riesgos que se pueden presentar durante la excavación de un túnel, basándose en la experiencia obtenida tanto a nivel nacional como internacional. Lo anterior con el fin de identificar la mayor cantidad de riesgos que podrían ocurrir durante la ejecución de este proyecto.

#### ***5.1.1 Posibles riesgos durante la excavación de un túnel***

Según se ha indicado anteriormente, la construcción y explotación de túneles trae consigo la ocurrencia de gran diversidad de riesgos, mismos que afectan el desarrollo del proyecto desde diferentes puntos de vista. A continuación se presenta una recopilación de los riesgos más frecuentes en excavaciones subterráneas.

Conviene resaltar que de los riesgos mostrados en este apartado se seleccionarán los que pueden afectar la excavación del nuevo túnel de Cachí, esto con base en las características propias del proyecto. Dicho punto será detallado en la sección 5.1.2.

#### 5.1.1.1 Condiciones geológicas inesperadas

Se asocia con el grado de incertidumbre que este tipo de obras siempre presenta. Dada la magnitud de estos proyectos, llevar a cabo un reconocimiento completo y detallado de todas las condiciones geotécnicas representa una campaña de investigación muy costosa tanto técnica como económicamente, e imposible desde un punto de vista práctico.

Entre las condiciones geológicas que pueden presentarse de manera inesperada se mencionan las siguientes:

- Condiciones diferentes de las encontradas en la investigación realizada.
- Cambios inesperados en la geología.
- Presencia de fallas.
- Alternancias de materiales duros y blandos.
- Presencia de materiales difíciles de excavar.

No obstante, una investigación planteada de manera adecuada durante las etapas preliminares, complementada con los datos obtenidos durante la construcción, puede reducir los efectos que tales condiciones representan.

#### 5.1.1.2 Inestabilidad del frente de excavación

La inestabilidad del frente de excavación es uno de los problemas más serios que pueden presentarse durante la excavación de un túnel. Ésta se presenta cuando los materiales no son auto estables durante el tiempo transcurrido entre su excavación y el momento en el que se aplica un método de soporte. Su ocurrencia puede desencadenar desde pequeñas caídas de bloques hasta el colapso del túnel.

Existen diferentes condiciones naturales que conducen a problemas de estabilidad, las cuales se encuentran asociadas principalmente con pérdidas de resistencia del macizo rocoso. Entre tales condiciones se resaltan las siguientes:

- Orientación desfavorable de discontinuidades.
- Orientación desfavorable de las tensiones con respecto al eje del túnel.
- Flujo de agua hacia el interior de la excavación.
- Zonas de meteorización o fracturamiento intenso.

De igual manera, la respuesta del macizo ante las acciones inducidas por la excavación, es un determinante en las condiciones de estabilidad del túnel. Es bien sabido que los procesos de excavación generan un desequilibrio en el estado tensional de la masa rocosa, por lo tanto, si ésta no cuenta con suficiente resistencia, los problemas de inestabilidad no se detendrán hasta alcanzar el equilibrio nuevamente, lo cual puede representar grandes sobreexcavaciones.

#### 5.1.1.3 Flujo de agua hacia el túnel

La existencia de flujos de agua subterránea en un macizo rocoso representa un problema cuando se producen filtraciones hacia el interior del túnel. Lo anterior depende fundamentalmente de la existencia de conductos conectados con la línea de túnel y de la permeabilidad de los materiales que en ellos se encuentren, así como el nivel de fracturación que presente la masa rocosa.

La filtración de importantes caudales de agua dentro del túnel provoca inundaciones que incluso pueden detener el proyecto. Tal es el caso del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís, el cual sufrió atrasos considerables debido a la inesperada presencia de agua (Chaves, 2012), tal como se muestra en la Figura 5.1.

Las zonas susceptibles a la filtración del agua son propensas a inestabilidades durante la excavación, esto debido a la pérdida de resistencia de la roca o por el lavado del relleno de las discontinuidades. Además, pueden ocurrir abatimientos del nivel freático regional, generando consecuencias negativas para las poblaciones locales.

Es importante realizar una correcta delimitación de las zonas en las que se espera la incidencia del agua y su área de influencia, de manera que la implementación de técnicas para el control de las filtraciones sea realmente efectiva y evite incurrir en costos adicionales a los proyectados.



**Figura 5.1**  
Presencia de agua en el túnel del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís  
Fuente: Chaves, 2012

#### 5.1.1.4 Avance a través de zonas de falla

Gran parte de los problemas que se generan durante la excavación de un túnel, se deben a la intersección de éste con zonas de falla. Las fallas se caracterizan por presentar baja resistencia, pero además, pueden constituir vías preferentes para la circulación de agua y acumular tensiones tectónicas significativas, creando planos principales de rotura. Su estudio es uno de los aspectos más importantes durante el diseño de un túnel, ya que su correcto reconocimiento y caracterización permite inferir los posibles riesgos que su presencia representa.

Según González et al. la incidencia de una falla en la estabilidad de una excavación depende de las características de la misma, las cuales pueden ser:

- Fallas caracterizadas por una o varias superficies de discontinuidad, planos de despegue o contactos mecánicos entre distintos materiales.

- Fallas caracterizadas por una zona de espesor variable y de baja resistencia, conformada por materiales blandos, inestables, plásticos o expansivos.
- Fallas caracterizadas por una zona de alta transmisibilidad hidráulica.

Otro aspecto importante, es la orientación e intersección de la falla con el túnel. Al ser planos de gran continuidad, pueden atravesar toda la sección y cortar otras discontinuidades, generando cuñas o bloques de gran tamaño, mismos que representan inestabilidades y por ende, sobreexcavaciones.

#### 5.1.1.5 Fluencia de la roca

Conocido comúnmente como "*squeezing rock*", es un fenómeno que depende no sólo de las propiedades de la roca, sino también del tiempo y los métodos de excavación y soporte que se adopten durante la construcción del túnel.

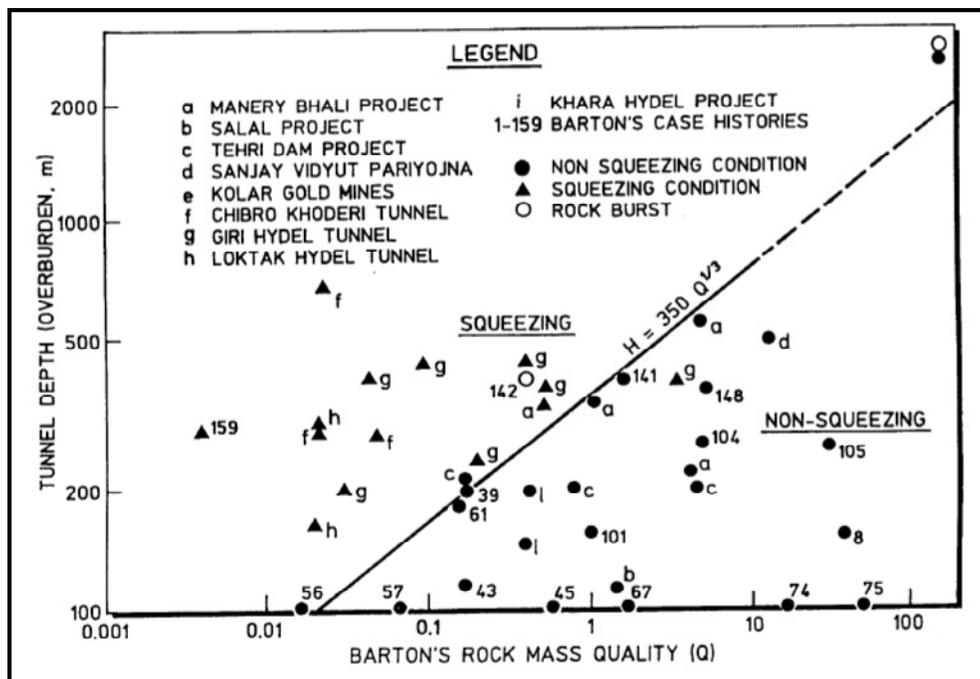
De acuerdo con la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM, 1994), el fenómeno se define como la ocurrencia de grandes deformaciones dependientes del tiempo, las cuales se generan al exceder el esfuerzo cortante máximo de la roca. La deformación puede terminar durante la construcción o puede extenderse por un mayor tiempo. Tales deformaciones provocan la convergencia del túnel.

La fluencia puede ocurrir en cualquier suelo o roca, siempre y cuando la combinación de los esfuerzos inducidos y las propiedades del material conlleven a que en algunas zonas alrededor del túnel se sobrepase el límite de esfuerzo cortante y la fluencia inicie.

Entre los factores que propician la ocurrencia de este fenómeno se mencionan: condiciones geológicas, propiedades de la roca, resistencia de la roca, esfuerzos *in situ* y presión de poro. Según se mencionó anteriormente, los métodos de excavación y soporte también se encuentran relacionados con la fluencia. Por ejemplo, si la instalación del soporte se retrasa, la masa rocosa se mueve hacia el túnel y la redistribución de esfuerzos se realiza alrededor del mismo. Al contrario, si la deformación de la roca es restringida, la fluencia generará, a largo plazo, cargas sobre el soporte de la roca.

Existen diversas aproximaciones empíricas para definir la ocurrencia del fenómeno de fluencia. Para efectos de este trabajo, se presenta la relación establecida por Singh et. al,

la cual fue obtenida a partir de 39 casos en los que se recolectaron datos del índice Q de Barton y la profundidad del túnel. Los autores graficaron la información obtenida para poder diferenciar los casos de fluencia de aquellos en los que no se presentó el fenómeno, tal como se indica en la Figura 5.2.



**Figura 5.2**

Aproximación para estimar la ocurrencia del fenómeno de fluencia

Fuente: Singh et. al, 1992

Según se observa, la ecuación de la línea que separa ambos casos es:

$$H = 350Q^{1/3} \quad (5-1)$$

Donde:

H = profundidad del túnel (m)

Q = índice de calidad de Barton

Los puntos que se encuentran sobre esta línea corresponden con los casos en los que se presentó el fenómeno de fluencia. Por lo tanto, la ocurrencia de esta condición se define mediante la siguiente expresión:

$$H \gg 350Q^{1/3} \quad (5-2)$$

#### 5.1.1.6 Subsidiencias del terreno superficial

La subsidencia es un fenómeno que se asocia con la ocurrencia de asentamientos o deformaciones en superficie debido a la construcción de excavaciones subterráneas, aunque también otros factores pueden verse involucrados. Su incidencia representa una amenaza para estructuras superficiales y servicios básicos, principalmente si el proyecto se desarrolla en el área urbana.

Los túneles con poca cobertura son más propensos a provocar subsidencias, no obstante, si la calidad del terreno es muy pobre, sus efectos se pueden presentar aún para coberturas considerables.

La problemática de las subsidencias se puede generar por varias razones, más su efecto dependerá principalmente de las características del terreno excavado y el método de excavación que se utilice. Entre tales razones se mencionan:

- Cambio tensional del macizo o relajamiento de esfuerzos, lo cual tiende a cerrar la sección del túnel.
- Sobreexcavación.
- Deformación del sostenimiento.
- Efectos de consolidación del terreno.

#### 5.1.1.7 Suelos o rocas expansivas

Los suelos expansivos (arcillas) o rocas con contenido de minerales expansivos (anhidritas) pueden provocar problemas durante la construcción o funcionamiento de un túnel. Tales problemas se manifiestan como levantamientos en el piso del túnel o presiones adicionales sobre el soporte del mismo. En caso de no aplicar las contramedidas necesarias, los problemas mencionados pueden conducir al colapso de la estructura.

Se resalta que la expansión se encuentra directamente ligada con las condiciones de humedad, es decir, variaciones de tales valores inciden en las presiones de hinchamiento de los materiales expansivos. Por ejemplo, una pérdida excesiva de humedad hace que el material se torne rígido y por ende, transmite mayores esfuerzos al soporte colocado, el

cual, de no contar con suficiente flexibilidad, puede fallar. Por tal motivo, es importante controlar el flujo de agua tanto durante como después de la construcción del túnel.

Conviene mencionar que, aún cuando las arcillas presentes en la roca no sean de tipo expansivo, las condiciones alternantes de humedad generan ciclos de hinchamiento y contracción, mismos que pueden conducir a la rotura por un mecanismo de fatiga progresiva del macizo rocoso.

#### 5.1.1.8 Roca explosiva

Este fenómeno se relaciona con la ocurrencia repentina y violenta de una falla frágil en roca intacta, la cual se genera cuando los esfuerzos *in situ* son muy altos y el confinamiento de la roca desaparece al realizarse la excavación. Al eliminar el confinamiento lateral de la roca, ésta se ve sometida a esfuerzos compresivos de gran magnitud que superan su resistencia, provocando la falla frágil antes mencionada.

La presencia de roca explosiva, además de generar inestabilidad en la excavación, puede provocar vibraciones excesivas en el terreno e incluso pérdida de vidas humanas.

#### 5.1.1.9 Zonas kársticas

La aparición del karst es una condición típica de los terrenos calcáreos. Su morfología puede ser muy variada, desde pequeños conductos que forman sistemas de redes hasta grandes cuevas continuas. Su presencia plantea alguno de los siguientes problemas:

- Inestabilidad de la excavación.
- Afluencia de agua tanto durante la construcción de la obra como durante su operación.

La inestabilidad se relaciona con la pérdida de las características geotécnicas del macizo, debido a la falta de confinamiento provocada por el karst. Las oquedades pueden ampliar la excavación, por lo que resulta necesario rellenarlas parcial o totalmente para poder continuar el túnel. De igual manera, en caso de que la roca se encuentre muy fracturada, la karstificación puede generar redes de pequeños conductos que dejan sin trabazón los bloques de roca, provocando la caída de los mismos cuando la excavación llega a estas zonas.

En cuanto a la afluencia del agua, ésta suele aparecer de forma súbita y varía según la posición de los niveles freáticos, por lo tanto, la circulación del agua puede cambiar con el tiempo, generando filtraciones en zonas que estaban secas durante la construcción.

#### 5.1.1.10 Afectación por voladuras

El uso de voladuras es un método ampliamente utilizado para la excavación de túneles en rocas duras (resistencia a la compresión mayor a 100 MPa), cuando el uso de sistemas mecánicos es poco factible. A pesar de ser un método bien conocido, puede provocar problemas relacionados con la ocurrencia de vibraciones excesivas, las cuales pueden afectar estructuras existentes en las inmediaciones del túnel, sobre todo si éste se desarrolla en zonas urbanas.

Para estimar el posible daño que las voladuras pueden ocasionar, se puede utilizar el *Blasting Damage Index* (BDI). Éste es un índice de sensibilidad que toma en cuenta parámetros relacionados con el tipo de voladura, características del macizo rocoso y de las estructuras cercanas. Se expresa de la siguiente manera:

$$BDI = \frac{V \cdot d \cdot C}{K_r \cdot T} \quad (5-3)$$

Donde:

V = vector suma de las velocidades pico en correspondencia con la estructura considerada (m/s).

d = densidad del material de la estructura interesada ( $t/m^3$ ).

C = velocidad de las ondas sísmicas de compresión (ondas P) en el macizo (km/s).

$K_r$  = constante de calidad de la estructura ( $\leq 1$ ).

T = resistencia dinámica a tracción del material de la estructura (MPa).

El índice BDI se relaciona con lo mostrado en el Cuadro 5.1 para cuantificar el daño esperado.

**Cuadro 5.1**  
Índice BDI

<b>BDI</b>	<b>Daño esperado</b>
< 0,125	Ningún daño
0,25	Ningún daño apreciable
0,5	Daño mínimo
0,75	Daño moderado
1,0	Daño notable, operaciones de reparación necesarias
1,5	Daño severo, operaciones de reparación difíciles
≥ 2	Colapso

Fuente: Della, 2009

De igual forma, el uso de voladuras puede provocar problemas en el interior del túnel, los cuales ponen en peligro a quienes se encuentran dentro del mismo. Entre tales problemas se resaltan: lanzamientos incontrolados de fragmentos de roca, producción de polvo y gases y daños a la roca remanente, los cuales eventualmente generan desprendimientos. Tales inconvenientes pueden surgir debido a un inadecuado diseño de la voladura o por anomalías en la geología y estructura de la roca.

#### 5.1.1.11 Ocurrencia de un sismo

Los túneles, a diferencia de las estructuras superficiales, son más seguros ante la presencia de un sismo. No obstante, siempre es importante evaluar el comportamiento que mantendrán bajo la acción sísmica, a fin de conocer el nivel de daños que puede sufrir tanto la roca como el revestimiento del túnel.

Principalmente, la respuesta de los túneles ante el movimiento del terreno se manifiesta como una deformación, la cual puede ser:

- Longitudinal (compresión – dilatación, flexión). Se presenta cuando las ondas sísmicas se propagan de forma paralela o formando un ángulo de incidencia con el eje del túnel.
- Ovalamiento (túneles circulares) o deformaciones transversales (túneles de sección rectangular). Se da cuando la onda se propaga en dirección perpendicular o cercanamente perpendicular al eje del túnel.

Se debe tomar en cuenta que el comportamiento del túnel depende no solamente de las características del sismo que se presente, sino también de las propiedades del macizo rocoso. Conviene decir entonces, que dicho comportamiento depende de la conjugación de varios factores, por ejemplo: magnitud del sismo, ubicación del túnel respecto a fallas activas, condición de la masa rocosa, cobertura del túnel, entre otros.

### **5.1.2 Riesgos asociados a la excavación del túnel de Cachí**

A partir de los riesgos descritos en la sección anterior y tomando en cuenta las condiciones propias del proyecto, se han identificado los riesgos asociados a la excavación del nuevo túnel. Un resumen de los mismos se presenta en el Cuadro 5.2 y en los siguientes apartados se muestra su detalle.

**Cuadro 5.2**  
Riesgos asociados a la excavación del túnel

<b>Riesgo</b>	<b>Identificación</b>
Condiciones geológicas inesperadas	PHCT2 – R1
Inestabilidad del frente de excavación	PHCT2 – R2
Flujo de agua hacia el túnel	PHCT2 – R3
Avance a través de zonas de falla	PHCT2 – R4
Afectación por voladuras	PHCT2 – R5
Afectación al túnel existente	PHCT2 – R6
Uso de método de excavación nuevo para el ICE	PHCT2 – R7

<sup>(1)</sup> PHCT2 = Proyecto Hidroeléctrico Cachí Túnel 2

#### 5.1.2.1 Condiciones geológicas inesperadas

Según se ha mencionado, llevar a cabo un reconocimiento completo y detallado de las condiciones geológicas de un túnel, es una tarea difícil de realizar. Por tal motivo, la incertidumbre asociada a tales condiciones siempre estará presente.

El nuevo túnel de Cachí, al encontrarse relativamente cerca del túnel existente, cuenta con la ventaja de tener un conocimiento previo de las condiciones presentes, las cuales, junto con la nueva información obtenida, permiten reducir la incertidumbre a la que se hizo

mención anteriormente. No obstante, al considerar que la geología puede ser muy variable de un punto a otro, no es posible tener la certeza de que la caracterización proyectada para el nuevo túnel sea definitiva.

Dentro de este contexto, suponer la homogeneidad del terreno en diferentes tramos puede ser riesgoso. Al establecer que las características del macizo no varían a través de una sección definida, puede dejarse de lado, por ejemplo, la presencia inesperada de discontinuidades, mismas que disminuyen la homogeneidad supuesta al representar variaciones en la calidad del macizo rocoso. En este sentido, se definen las siguientes zonas de riesgo:

- Estación 2+610 a 3+310.
- Estación 3+340 a 3+790.
- Estación 3+820 a 4+060.

Tales zonas se encuentran separadas por fallas previamente determinadas, razón por la cual se han considerado como tres sitios de riesgo y no uno solo. Se han definido como áreas de riesgo debido a que se contempla únicamente la presencia de brechas, sin embargo, pueden existir alternancias con otros materiales de mejores o peores condiciones mecánicas, afectando las premisas tomadas para los trabajos de excavación. Además, pueden presentarse discontinuidades que no han sido identificadas durante los trabajos preliminares, lo cual disminuye la calidad del macizo rocoso definido.

#### 5.1.2.2 Inestabilidad del frente de excavación

A partir del perfil geológico del túnel, es posible identificar aquellas zonas o secciones en las cuales es posible la ocurrencia de inestabilidades en el frente de excavación. En este caso en particular, las inestabilidades se asocian principalmente con la presencia de rocas de baja calidad mecánica, es decir, materiales fracturados y/o alterados, propensos a generar desprendimientos.

Según se ha mencionado previamente en este trabajo, los desprendimientos pueden ocurrir debido a la descompresión del macizo, con consecuentes aperturas de las juntas y

deslizamientos de bloques. Tal condición es típica de materiales fracturados al momento de realizar excavaciones a través de ellos.

Durante la excavación del túnel actual se utilizó una denominación geomecánica de siete niveles (Cervantes y Granados, 2006), siendo los tipos IV y V los materiales de características más pobres encontrados a lo largo del túnel. Tales niveles se describen a continuación:

- Tipo IV: roca blocosa y en partes descompuesta. Meteorización presente. Mucha diaclasa y fracturas. Generalmente necesita ser ademada cuando hay presencia de agua de infiltración. No hay presión lateral.
- Tipo V: roca muy diaclasada, blocosa y con zonas descompuestas. Meteorización en parte avanzada. Presión lateral puede manifestarse. Debe ademarse en arcos de acero de 26,6 kg/m, separados 1,5 m uno de otro mínimo.

De acuerdo con la clasificación geomecánica RMR, los materiales anteriormente descritos correlacionan con la clase IV, es decir, corresponden con rocas de mala calidad y presentan una valoración entre 21 y 40. El valor de GSI que se les ha asignado es de 40, según las características que se muestran en la Figura 5.3.

En la figura mencionada se puede observar que los materiales en cuestión presentan superficies suaves, ligeramente alteradas. Tal condición favorece la ocurrencia del fenómeno de dilatancia<sup>2</sup>, ya que al existir poca fricción (trabazón) entre los bloques de roca es más probable que continúen su movimiento, provocando inestabilidades y por ende, caídos dentro del túnel.

---

<sup>2</sup> Movimiento relativo entre bloques del macizo rocoso, reflejado como un aumento de volumen.

<p>ÍNDICE GEOLÓGICO DE RESISTENCIA GSI (<i>geological strength index</i>)</p> <p>A partir de la clasificación obtenida en la Figura 3.94 seleccionar el cuadro correspondiente en este ábaco y obtener el valor medio del índice GSI.</p>		CONDICIÓN DEL FRENTE				
ESTRUCTURA		MUY BUENA (MB) Superficies muy rugosas sin alterar	BUENA (B) Superficies rugosas ligeramente alteradas, con patinas de oxidación	MEDIA (M) Superficies suaves moderadamente alteradas	POBRE (P) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos compactos conteniendo fragmentos rocosos	MUY POBRE (MP) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos arcillosos
	<p><b>BLOQUES REGULARES (BR)</b> Macizo rocoso sin alterar. Bloques en contacto de forma cúbica formados por tres familias de discontinuidades ortogonales, sin relleno.</p>	80	70			
	<p><b>BLOQUES IRREGULARES (BI)</b> Macizo rocoso parcialmente alterado. Bloques en contacto de forma angular formados por cuatro o más familias de discontinuidades con rellenos con baja proporción de finos.</p>		60	50		
	<p><b>BLOQUES Y CAPAS (BC)</b> Macizo alterado, plegado y fracturado con múltiples discontinuidades que forman bloques angulosos y con baja proporción de finos.</p>			40	30	
	<p><b>FRACTURACIÓN INTENSA (FI)</b> Macizo rocoso muy fracturado formado por bloques angulosos y redondeados, con alto contenido de finos.</p>				20	10

**Figura 5.3**

Índice geológico de resistencia (GSI)

Fuente: González et al., 2002

Modificado por: Marín, 2012

De acuerdo con la caracterización geotécnica realizada por el ICE a lo largo de la línea de túnel, se ha podido identificar la presencia de estos materiales en varias secciones. El Cuadro 5.3 muestra la ubicación de tales zonas, así como el espesor de las mismas y el tipo de roca presente. En el Anexo A se presenta el perfil geotécnico del túnel, a partir del cual se ha obtenido la información que a continuación se indica.

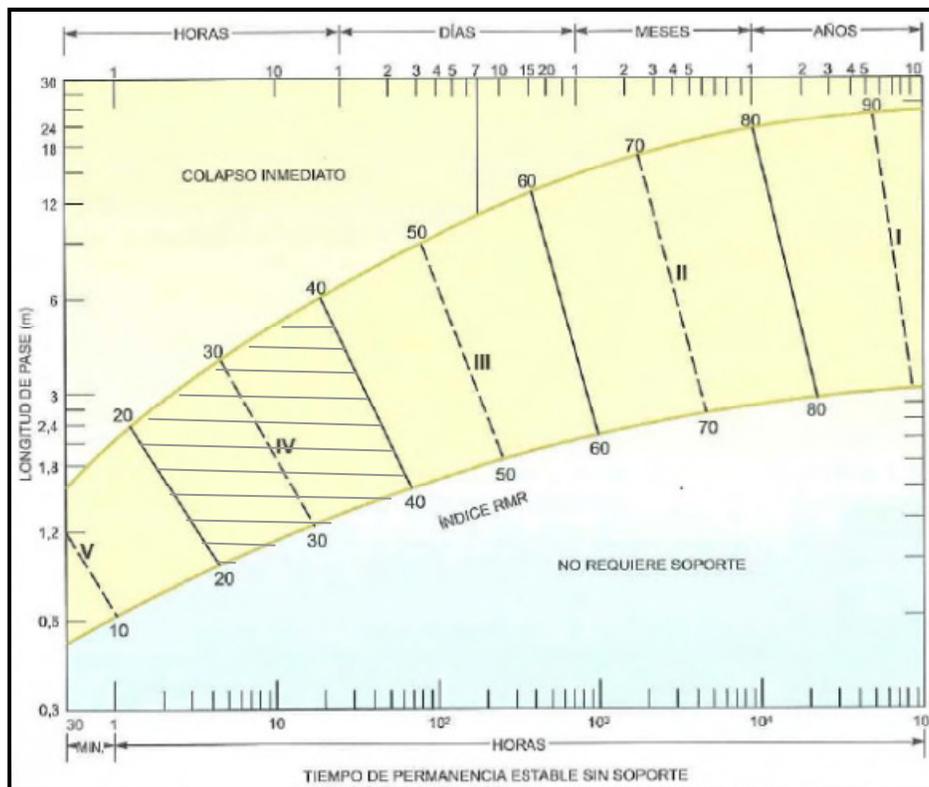
**Cuadro 5.3**  
Identificación de posibles zonas de inestabilidad

<b>Zona</b>	<b>Ubicación (estación)</b>	<b>Espesor (m)</b>	<b>Material</b>
1	0 + 200	30,0	Brechas severamente fisuradas
2	0 + 800	200,0	Tobas severamente fisuradas + jaboncillo de falla <sup>(1)</sup>
3	1+ 150	30,0	Lavas
4	1 + 220	50,0	Brechas + Tobas poco a medianamente fisuradas
5	1 + 410	40,0	Tobas poco a medianamente fisuradas
6	1 + 540	40,0	Lavas mediana a severamente fisuradas
7	1 + 640	30,0	Lavas medianamente fisuradas
8	2 + 070	20,0	Brechas poco fisuradas
9	3 + 910	100,0	Brechas poco fisuradas
10	4 + 150	100,0	Lavas + Brechas medianamente fisuradas
11	4 + 370	40,0	Lavas + Brechas medianamente fisuradas
12	4 + 470	20,0	Lavas + Brechas medianamente fisuradas
13	5 + 490	30,0	Lavas poco fisuradas + Dique intrusivo
14	5 + 560	20,0	Dique intrusivo
15	5 + 640	20,0	Dique intrusivo
16	5 + 710	50,0	Brechas
17	5 + 860	40,0	Dique intrusivo + Brechas poco fisuradas

<sup>(1)</sup> Corresponde con rellenos de falla blandos, plásticos, tipo arcillas.

Conviene mencionar que tales materiales no son auto soportantes durante lapsos prolongados. Con base en la clasificación RMR es posible definir el tiempo de mantenimiento, el cual varía según la longitud de avance; por ejemplo: para 2,5 m de avance, el tiempo máximo de sostenimiento es de aproximadamente 10 horas. La zona sombreada en la Figura 5.4 muestra de manera gráfica la variación mencionada para los macizos clase IV.

Debido a que los materiales en cuestión no son auto soportantes durante mucho tiempo, es necesario colocar sistemas de sostenimiento. Su instalación debe realizarse dentro del período en el que se estime que el macizo puede mantenerse estable por sí mismo, caso contrario, se presentarán los problemas indicados con anterioridad.



**Figura 5.4**

Longitud de pase y tiempos de estabilidad sin soporte

Fuente: González et al., 2002

Modificado por: Marín, 2012

### 5.1.2.3 Flujo de agua hacia el túnel

Según se ha mencionado, durante la excavación del túnel actual se produjeron pocas filtraciones, principalmente porque el macizo rocoso es, en general, de baja permeabilidad. No obstante, podrían presentarse algunos casos de goteos o chorros de agua, relacionados con las siguientes razones:

- Zonas fracturadas

Para efectos prácticos, las brechas presentes en la línea de túnel se caracterizan por presentar una permeabilidad primaria variable entre baja y muy baja, por lo que la presencia de agua puede ir desde humedecimientos hasta goteos leves. Sin embargo, al verse sometidas a procesos tectónicos, puede generarse un alto grado de fracturación, lo cual da paso a una permeabilidad secundaria importante y por ende, mayores filtraciones. Tal condición es típica de zonas cercanas a fallas.

Para el caso de las lavas y diques intrusivos, las condiciones de su formación inducen el desarrollo de fisuras, mismas que pueden acrecentarse debido a la tectónica de la zona. Por tal motivo, estos materiales son considerados como permeables y pueden generar desde goteos intensos a chorros moderados.

- Presencia de fallas

Cuando los materiales presentes en las zonas de falla se asocian con rocas fracturadas, éstas pueden convertirse en conductos preferentes para la filtración del agua, sobre todo si se encuentran conectadas con el nivel freático y/o acuíferos regionales.

Las fallas son zonas de permeabilidad elevada, por lo que en caso de encontrarse en un medio impermeable (brechas), se da paso a la creación de un sello hidrogeológico, es decir, sitios donde se da una acumulación importante de agua. Al romper estos sellos debido al proceso de excavación, se genera un flujo repentino en forma de chorros moderados a intensos.

- Zonas de baja cobertura

Las zonas donde la cobertura es baja, asociadas principalmente con el paso de quebradas, son propensas a la creación de perfiles de meteorización. En ellos, se puede presentar la ocurrencia y/o conjugación de los siguientes procesos:

- Descompresión del macizo rocoso.
- Lavado de rellenos.
- Lixiviación<sup>3</sup>.

Tales condiciones propician la filtración del agua, ya sea en forma de goteos o chorros, según el grado de afectación que éstas representen.

El Cuadro 5.4 muestra la ubicación de las zonas en las que se presenta alguna de las condiciones descritas anteriormente. Las mismas han sido obtenidas a partir del perfil geotécnico del Anexo A.

---

<sup>3</sup> Disolución de rellenos cristalinos o minerales.

**Cuadro 5.4**  
Identificación de zonas con posible presencia de agua

<b>Zona</b>	<b>Ubicación (estación)</b>	<b>Espesor (m)</b>	<b>Presencia del agua</b>	<b>Material</b>
1	0 + 200	30,0	Chorro intenso	Brecha severamente fisurada
2	0+ 590	80,0	Goteo intenso	Brecha moderadamente fisurada
3	0 + 800	200,0	Chorro moderado	Fallas + Toba severamente fisurada
4	1 + 410	90,0	Chorro moderado	Brechas y lavas moderadamente fisuradas
5	1 + 540	40,0	Goteo intenso	Lavas moderada a severamente fisuradas
6	1 + 640	230,0	Goteo intenso	Fallas + Lavas severamente fisuradas
7	2 + 260	20,0	Chorro moderado	Brechas poco fisuradas
8	2 + 340	50,0	Chorro moderado	Lavas moderadamente fisuradas
9	2 + 390	100,0	Goteo intenso	Brechas poco fisuradas + Lavas severamente fisuradas
10	2 + 590	30,0	Goteo intenso	Lavas moderadamente fisuradas
11	3 + 310	40,0	Chorro moderado	Falla
12	3 + 380	40,0	Chorro moderado	Brechas poco fisuradas
13	3 + 820	60,0	Goteo intenso	Brechas poco fisuradas + Falla
14	3 + 910	10,0	Goteo intenso	Brechas poco fisuradas
15	4 + 120	20,0	Chorro moderado	Lavas y brechas moderadamente fisuradas
16	4 + 170	80,0	Chorro moderado	Lavas y brechas moderadamente fisuradas + Falla
17	4 + 290	20,0	Goteo intenso	Lavas severamente fisuradas
18	4 + 340	50,0	Goteo intenso	Lavas y brechas moderadamente fisuradas
19	4 + 390	140,0	Chorro moderado	Lavas y brechas moderadamente fisuradas
20	4 + 760	50,0	Goteo intenso	Brechas poco fisuradas
21	4 + 950	50,0	Chorro intenso	Brechas poco fisuradas + Dique
22	5 + 010	30,0	Chorro moderado	Falla

Según se observa en el mismo Anexo A, se han identificado zonas húmedas y de goteos ligeros a moderados, pero no es de esperar que en tales secciones se produzcan mayores problemas durante los trabajos de excavación.

#### 5.1.2.4 Avance a través de zonas de falla

Con base en el modelo geológico - geotécnico del túnel realizado por el ICE (Anexo A) se ha reconocido la presencia de 15 fallas a través de las cuales será preciso excavar. Su ubicación y espesor se muestra en el Cuadro 5.5.

**Cuadro 5.5**  
Identificación de zonas de falla

<b>Zona</b>	<b>Ubicación (estación)</b>	<b>Espesor aproximado (m)</b>
1	0 + 810	20,0
2	0 + 970	40,0
3	1 + 540	20,0
4	1 + 640	20,0
5	1 + 810	40,0
6	2 + 460	30,0
7	3 + 320	30,0
8	3 + 820	30,0
9	4 + 060	20,0
10	4 + 220	15,0
11	5 + 060	20,0
12	5 + 180	20,0
13	5 + 580	10,0
14	5 + 720	15,0
15	5 + 800	20,0

Conviene mencionar que entre mayor sea el espesor de la falla, mayor problema representa; esto por cuanto los procesos de desgaste y/o movimiento han estado presentes durante un período más prolongado, provocando el crecimiento de la falla y menor calidad de los materiales presentes en ella.

Además, el tipo de material existente en la falla determina los problemas que se pueden presentar. Principalmente se mencionan dos condiciones críticas:

- Existencia de materiales muy fracturados y con erosión interna, mismos que consecuentemente podrían generar cavernas sobre la línea de túnel debido a pérdidas excesivas de resistencia, lo cual se traduce en grandes cantidades de material cayendo dentro del túnel.
- Presencia de materiales muy deformables que generan convergencias.

#### 5.1.2.5 Afectación por voladuras

De acuerdo con lo mostrado en el Cuadro 4.7 (Frentes de excavación), se tiene previsto el uso de perforación y voladura en sólo un frente de excavación. Sin embargo, su aplicación requiere de un adecuado planeamiento, ya que de lo contrario, se da paso a la ocurrencia de situaciones indeseables durante los trabajos de excavación.

Para efectos del presente trabajo, el riesgo identificado gira en torno a fracturamientos excesivos de la roca remanente, situación que consecuentemente puede producir desprendimientos en el frente de trabajo, lo cual genera sobreexcavaciones y por ende, mayores costos.

Según el modelo geológico del túnel, los materiales en los que se aplicarán voladuras corresponden con coladas de lavas y brechas, siendo éstas últimas las rocas predominantes en esta sección. Se resalta que tales materiales clasifican como rocas tipo II y III en el sistema RMR, lo que significa que el macizo rocoso presenta una calidad mecánica variable entre media y buena. Esto se traduce en la presencia de materiales poco o ligeramente fracturados, en los cuales no es de esperar que se generen grandes afectaciones debido a las voladuras.

No obstante lo anterior, en las inmediaciones de la Ventana B, específicamente entre las estaciones 3+790 y 4+000, se encuentran rocas de mala calidad, clasificadas como clase IV en el sistema RMR. En dicha sección, es probable que los materiales se encuentren alterados y fracturados, por lo que al aplicar voladuras, se puede incrementar el fracturamiento de la roca remanente, provocando los problemas descritos previamente.

#### 5.1.2.6 Afectación al túnel existente

Debido al desarrollo cercano del nuevo túnel con respecto al actual, es importante identificar las posibles afectaciones que tal condición puede provocar, esto con el fin de prevenir cualquier situación que pueda poner en peligro el funcionamiento normal del túnel existente.

Principalmente, la posible afectación del túnel actual gira en torno a tres aspectos:

- Vibraciones por voladuras, las cuales podrían inducir fisuras en el revestimiento del túnel existente. Tal situación puede agravarse si la vibración coincide con la existencia de una falla que atraviese ambos túneles y funcione como medio de conducción de la vibración.
- Relajamiento excesivo del macizo rocoso debido a la excavación del segundo túnel, afectando negativamente la estabilidad del primero.
- Variación de las presiones hidrostáticas, lo cual provoca el riesgo de fisuración del revestimiento del primer túnel, debido a un exceso de carga hidráulica interior respecto a la carga exterior.

#### 5.1.2.7 Uso de método de excavación nuevo para el ICE

El uso de una rozadora como método de excavación es un sistema innovador para el ICE, siendo el túnel de Cachí la primera oportunidad en la que se utiliza un método de este tipo. Por tal motivo, su uso implica un riesgo, ya que no se cuenta con experiencia en cuanto a su funcionamiento, rendimientos y aplicación a la geología de nuestro país.

Según fue indicado en el Cuadro 4.7 (Frentes de excavación), se tiene previsto el uso de la rozadora en tres frentes. En tales secciones existe una variabilidad importante en cuanto a los tipos de materiales y sus características, razón por la cual el comportamiento de la máquina puede variar de una sección a otra, incluso en zonas cercanas. Debido a lo anterior, es importante disponer del método tradicional de perforación y voladura, en caso de que la utilización de la rozadora represente un problema adicional a la actividad de excavación.

Además, conviene destacar algunas de las desventajas que presenta la rozadora seleccionada (cabeza de corte transversal, *ripping*):

- Perfilado ligeramente irregular del frente de excavación ya que debido a la geometría de la cabeza se pueden generar pequeñas sobreexcavaciones. Un ejemplo de dicha irregularidad se presenta en la Figura 5.5.



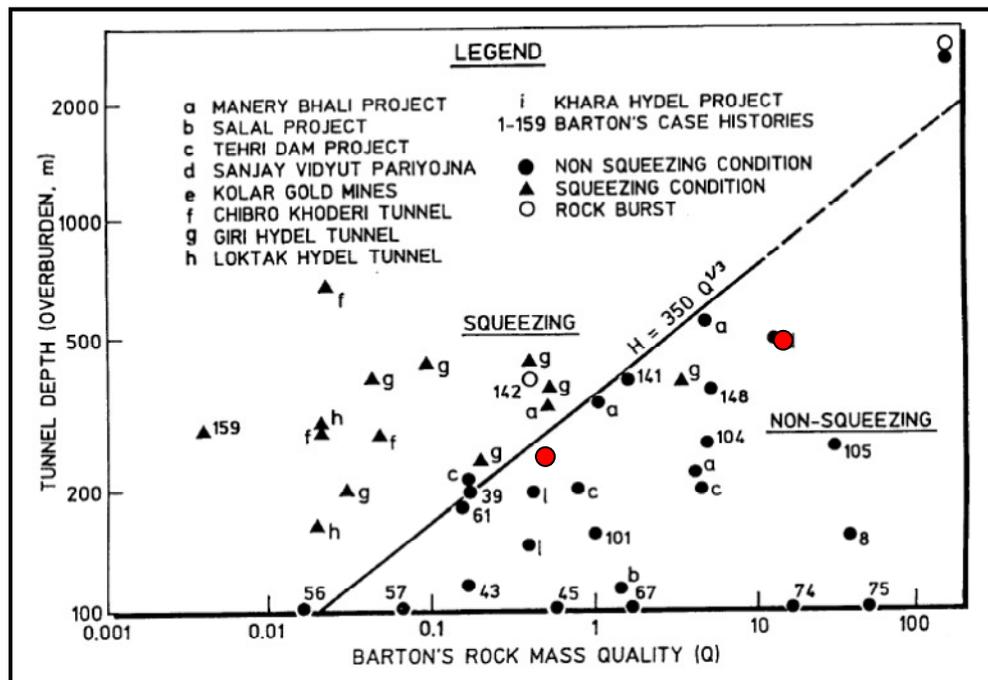
**Figura 5.5**  
Perfilado irregular del frente de excavación  
Fuente: Jiménez, 2012

- Difícil penetración en el frente de excavación, lo que disminuye su rendimiento.
- Movimientos laterales inesperados, por lo que no es recomendable la presencia de personas en los alrededores de la máquina mientras ésta se encuentra en funcionamiento.
- No es posible estabilizar el frente de excavación inmediatamente, debido al poco espacio existente entre la máquina y la sección excavada. Por tal motivo es preciso retirar la rozadora para ingresar a estabilizar el frente, lo cual torna más lento el proceso de excavación.

### 5.1.2.8 Riesgos no analizados

Se resalta que no se han elegido algunos de los riesgos descritos en la sección 5.1.1, esto debido a las siguientes razones:

- El índice Q de las rocas presentes en la línea de túnel varía aproximadamente entre 0,68 y 18. De acuerdo con lo indicado en el apartado 5.1.1.5 y lo mostrado en la Figura 5.6 (puntos en rojo), se obtiene que la fluencia de la roca no es una condición esperable durante los trabajos de excavación, motivo por el cual no representa un riesgo para este proyecto. Los puntos mostrados corresponden con las condiciones consideradas como críticas para este riesgo:
  - Zona donde se presentan las rocas de menor calidad (clase IV) y mayor cobertura.
  - Sección donde se presenta la mayor cobertura del túnel.



**Figura 5.6**

Estimación del fenómeno de fluencia para el túnel de Cachí

Fuente: Singh et. al, 1992

Modificado por: Marín, 2012

- La cobertura del túnel es apreciable, varía entre 50,0 m y 500 m, razón por la cual no se considera que las variaciones en el terreno como producto de la excavación, representen un impacto significativo en la superficie, es decir, generen subsidencias.
- No se han identificado suelos o rocas expansivas a lo largo de la línea del túnel. Únicamente se ha detectado la existencia de un jaboncillo de falla entre las estaciones 0+820 y 0+960, no obstante, su presencia no es significativa debido al poco espesor que representa dentro de la totalidad del trazado del túnel.
- La presencia de la roca explosiva se da generalmente para coberturas muy grandes, donde la carga sobre el túnel representa una concentración de esfuerzos importantes, lo cual no es el caso de Cachí. Además, de acuerdo con lo indicado por Chaves (2012), es probable que no existan grandes esfuerzos *in situ* en la línea de túnel, ya que la morfología del sitio propicia la disipación de los mismos. De igual forma, las brechas (tipo de roca predominante en el túnel) son materiales dúctiles, lo cual atenúa el efecto de la roca explosiva.
- El túnel se ubica en un medio volcánico, el cual no propicia la formación de calizas y por lo tanto, de zonas kársticas.
- La incidencia de un sismo en un túnel es poco significativa, ya que por tratarse de una obra subterránea, el movimiento percibido es bajo. Además, se resalta que la zona en la que se encuentra el túnel no registra una gran actividad sísmica, por lo que no es de esperar la ocurrencia de sismos importantes que pudieran significar un alto riesgo.

## 5.2 Criterios de aceptación

Es muy importante establecer adecuadamente los criterios de aceptación que permitan definir la tolerancia de los riesgos encontrados. Se destaca que estos criterios deben abarcar los requerimientos no sólo del ICE, sino también los de todas aquellas personas involucradas en el proceso, tales como quienes se encuentran directamente afectados por el desarrollo de las obras. Lo anterior con el fin de alcanzar la verdadera calidad del proyecto, lo cual se traduce en el éxito del mismo.

Para este caso en particular, la tolerancia de los riesgos identificados se encuentra definida en gran medida por las condiciones bajo las cuales se desarrollará el proyecto, es decir, la

cercanía entre el túnel existente y el que se construirá. Lo más importante es que los trabajos que se lleven a cabo no afecten de manera significativa las obras existentes y por ende, el funcionamiento normal de la Planta.

Los criterios de aceptación de este proyecto son establecidos a partir del nivel de riesgo que cada uno de éstos representa. Lo anterior se determina con base en la puntuación obtenida para cada riesgo, la cual es el resultado de multiplicar la probabilidad de ocurrencia por el impacto, tal como se muestra en el siguiente apartado. En el Cuadro 5.6 se presentan los niveles de riesgo que se utilizarán para llevar a cabo la clasificación de cada riesgo identificado. La Figura 5.7 muestra la matriz de decisión realizada a partir de la información indicada en el Cuadro 5.6.

**Cuadro 5.6**  
Definición de niveles de riesgo

<b>Riesgo</b>	<b>Nivel de riesgo</b>	<b>Contramedidas necesarias</b>
17 – 25	Intolerable	La construcción no puede empezar antes que el riesgo sea reducido. Si el riesgo no puede ser mitigado, el proyecto puede ser detenido.
13 – 16	Sustancial	La construcción no puede empezar antes que el riesgo sea reducido. La solución para reducir el riesgo existe pero necesita recursos adicionales.
9 – 12	Considerable	La construcción puede ser empezada y continuada hasta que es necesario aplicar medidas de mitigación.
5 – 8	Menor	La construcción es sujeta a retrasos. Es necesario considerar soluciones para reducir costos.
1 – 4	Despreciable	Ninguna.

Fuente: Clayton, 2001

RIESGO		Puntuación de consecuencias				
		1	2	3	4	5
Puntuación de probabilidad	1	Despreciable	Despreciable	Despreciable	Despreciable	Menor
	2	Despreciable	Despreciable	Menor	Menor	Considerable
	3	Despreciable	Menor	Considerable	Considerable	Sustancial - Intolerable
	4	Despreciable	Menor	Considerable	Sustancial - Intolerable	Sustancial - Intolerable
	5	Menor	Considerable	Sustancial - Intolerable	Sustancial - Intolerable	Sustancial - Intolerable

**Figura 5.7**  
Matriz de decisión

Según se observa, el autor ha definido cinco categorías, cada una con una breve explicación de la contramedida requerida. A partir de dichas contramedidas es posible establecer las condiciones deseables para el proyecto, es decir, los niveles aceptables a los cuales se procurará que cada riesgo identificado se clasifique antes de iniciar el proceso de construcción.

Dada la envergadura del proyecto y las condiciones particulares en las que éste se desarrollará, se ha establecido que para aquellos riesgos cuya clasificación sea igual o mayor al nivel "considerable" será necesario plantear medidas de mitigación que permitan llevar el riesgo a los niveles "menor" o "despreciable". No obstante, en caso de que las medidas a tomar representen grandes cambios (diseño o costos, por ejemplo), se admitirá un nivel de riesgo considerable, siempre y cuando se realice el adecuado seguimiento del mismo en etapas posteriores del proyecto.

### 5.3 Clasificación de riesgos

Para poder clasificar cada uno de los riesgos identificados, es necesario asignar una puntuación tanto a su probabilidad de ocurrencia como al impacto de sus consecuencias. Posteriormente se establece el nivel de riesgo resultante, utilizando la siguiente expresión:

$$R = P \times I$$

(5-4)

Donde:

R = nivel de riesgo, cuyo valor máximo en este caso es de 25.

P = probabilidad de ocurrencia.

I = impacto de las consecuencias.

Para definir las puntuaciones correspondientes a la probabilidad e impacto de cada riesgo se ha utilizado la información de los Cuadros 5.7 y 5.8, mostrados a continuación.

**Cuadro 5.7**  
Puntuaciones para asignar la probabilidad de ocurrencia

<b>Probabilidad</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Descripción</b>
Frecuente	5	Posibilidad de ocurrir repetidamente durante la excavación del túnel.
Probable	4	Posibilidad de ocurrir varias veces durante la excavación del túnel.
Ocasional	3	Posibilidad de ocurrir al menos una vez durante la excavación del túnel.
Remota	2	Poca posibilidad de ocurrir durante la excavación del túnel.
Improbable	1	No existe posibilidad de ocurrir durante la excavación del túnel.

Fuente: Yoo, 2006

**Cuadro 5.8**  
Puntuaciones para asignar el impacto de las consecuencias

<b>Consecuencia</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Descripción</b>
Catastrófica	5	Pérdida de toda una sección del túnel o potencial de pérdida de la producción durante más de 2 meses.
Crítica	4	Daños considerables al túnel que generen retrasos de al menos 2 meses.
Seria	3	Algún daño al túnel que genere retrasos de al menos una semana.
Moderada	2	Daños menores que generen pequeños retrasos.
Despreciable	1	Consecuencias y atrasos no significativos.

Fuente: Yoo, 2006  
Modificado por: Marín, 2012

A fin de incluir una mayor objetividad en el proceso, se recurrió al criterio de profesionales expertos en el área de túneles. En este sentido, lo que se hizo fue buscar una conjugación de opiniones, es decir, que cada profesional brindara sus observaciones sobre cada riesgo en análisis, de manera que con base en tales criterios se lograra una unificación de las puntuaciones de probabilidad y consecuencia. De igual forma, se utilizó información de la consultoría realizada por TunnelConsult (Della, 2009), donde se estableció una primera estimación de algunos de los riesgos identificados en este proyecto.

A partir de lo indicado anteriormente, se buscó dar una calibración a la asignación de puntuaciones, procurando que las premisas tomadas sean un indicativo bastante acertado de la realidad y así asegurar que los niveles de riesgo determinados realmente se ajusten a las características del proyecto y no sean subestimados o sobreestimados.

Las puntuaciones de probabilidad y consecuencias asignadas a cada uno de los riesgos identificados para el nuevo túnel, se detallan en los Cuadros 5.9 y 5.10.

**Cuadro 5.9**  
Puntuaciones asignadas a la probabilidad

Identificación	Probabilidad	Puntuación	Justificación
PHCT2 – R1 Condiciones geológicas inesperadas	Ocasional	3	Se ha supuesto la homogeneidad del terreno en un tramo del túnel, por lo que en esta zona pueden presentarse problemas si las condiciones supuestas difieren en gran medida de la realidad.
PHCT2 – R2 Inestabilidad del frente de excavación	Probable	4	Se han identificado zonas en las que, debido a la pobre calidad de la roca, pueden generarse inestabilidades. Su presencia se da en diferentes sectores a lo largo de la línea de túnel, motivo por el cual, es probable que las inestabilidades ocurran varias veces.
PHCT2 – R3 Flujo de agua hacia el túnel	Probable	4	El macizo rocoso es, en general, de características impermeables a poco permeables. No obstante, se han identificados varias zonas de fracturación elevada asociadas con la presencia de goteos a chorros intensos, mismos que podrían generar problemas durante los trabajos de excavación.
PHCT2 – R4 Avance a través de zonas de falla	Probable	4	De acuerdo con el modelo geológico realizado por el ICE, se han identificado 15 fallas que atraviesan la línea de túnel, lo que indica que se pueden presentar problemas varias veces durante la excavación del túnel a través de estas zonas.
PHCT2 – R5 Afectación por voladuras	Remota	2	El ICE cuenta con gran experiencia en el uso de voladuras, por lo que es poco probable que su aplicación represente afectaciones negativas. Además, su uso se tiene previsto únicamente en un frente de excavación, por lo que la probabilidad de que su aplicación represente un problema generalizado en todo el túnel es poca.
PHCT2 – R6 Afectación al túnel existente	Remota	2	Según el informe de TunnelConsult (Della, 2009) con una distancia centro - centro de tres diámetros es muy difícil que pueda haber afectación entre túneles paralelos. Para el caso en estudio, esta distancia varía entre 7 y 12 diámetros, por lo que no es de esperar que el efecto de la excavación del nuevo túnel sobre el existente sea significativo.
PHCT2 – R7 Uso de método de excavación nuevo para el ICE	Probable	4	Como se ha indicado, se tiene previsto el uso de la rozadora en tres frentes, es decir, en la mayor parte del túnel se utilizará este equipo. Debido a lo anterior, existe la posibilidad de que se presenten problemas varias veces durante los trabajos de excavación. Al tratarse de una maquinaria nueva, la curva de aprendizaje se irá creando conforme se avance en la excavación, lo cual podría tornarse un proceso lento.

**Cuadro 5.9 (cont.)**  
Puntuaciones asignadas a la probabilidad

Identificación	Probabilidad	Puntuación	Justificación
PHCT2 – R8 Fluencia de la roca	Improbable	1	A partir de lo detallado en el apartado 5.1.1.5, se ha encontrado que la fluencia de la roca no es una condición esperable durante los trabajos de excavación.
PHCT2 – R9 Subsidencias del terreno superficial	Improbable	1	El túnel presenta una cobertura apreciable, por lo que las variaciones en el terreno como producto de la excavación no representan un impacto significativo en superficie.
PHCT2 – R10 Suelos o rocas expansivas	Improbable	1	Con base en los trabajos de exploración previa realizados por el ICE, no se ha identificado la presencia de suelos o rocas expansivas a lo largo de la línea de túnel.
PHCT2 – R11 Roca explosiva	Improbable	1	De acuerdo con lo indicado por Chaves (2012), es probable que no existan grandes esfuerzos <i>in situ</i> que propicien la ocurrencia del fenómeno. De igual forma, las brechas (roca predominante) son materiales dúctiles que atenúan el efecto de la roca explosiva.
PHCT2 – R12 Zonas kársticas	Improbable	1	El túnel se encuentra en un medio volcánico, en el cual no se da la formación de calizas y por ende, zonas kársticas.
PHCT2 – R13 Ocurrencia de un sismo	Improbable	1	La zona en la que se encuentra el túnel no registra una gran actividad sísmica, por lo que no es de esperar la ocurrencia de sismos de importante magnitud.

**Cuadro 5.10**  
Puntuaciones asignadas a las consecuencias

Identificación	Consecuencia	Puntuación	Justificación
PHCT2 – R1 Condiciones geológicas inesperadas	Moderada	2	Se cuenta con la experiencia de la excavación del primer túnel, por lo que se tiene conocimiento de las condiciones existentes y el tipo de problemas que las mismas provocan. Por tal motivo, no es de esperar un impacto significativo por la ocurrencia de este riesgo.
PHCT2 – R2 Inestabilidad del frente de excavación	Crítica	4	Según se ha mencionado, las inestabilidades en el frente de excavación se traducen en caída de bloques dentro del túnel, lo cual genera sobreexcavaciones y en el peor de los casos, pérdidas de secciones completas. Tales condiciones traen consigo mayores costos y retrasos importantes en el desarrollo del proyecto.
PHCT2 – R3 Flujo de agua hacia el túnel	Crítica	4	La presencia de agua dentro del túnel puede provocar inundaciones, que de no ser controladas pueden detener la excavación durante tiempos prolongados. De igual forma, existe la posibilidad de variar la posición del nivel freático regional, lo cual desencadena consecuencias negativas para la población de la zona debido a la afectación de manantiales de abastecimiento público.
PHCT2 – R4 Avance a través de zonas de falla	Crítica	4	Las fallas son zonas de baja calidad mecánica y conductos preferentes del agua, por lo que son propensas a generar daños considerables al excavar a través de ellas sin ningún tipo de previsión.
PHCT2 – R5 Afectación por voladuras	Moderada	2	Al utilizar voladuras controladas, tal como lo hace el ICE, los efectos sobre la roca remanente son escasos y por ende, los daños provocados son pequeños y no producen grandes retrasos.
PHCT2 – R6 Afectación al túnel existente	Crítica	4	Cualquier daño sobre el túnel existente podría ocasionar afectaciones en el funcionamiento normal de la Planta, lo cual puede ir desde una disminución en la generación total de energía hasta incluso el detenimiento de la producción.
PHCT2 – R7 Uso de método de excavación nuevo para el ICE	Seria	3	El tipo de rozadora seleccionada no proporciona ningún tipo de soporte en el frente de excavación, por lo que puede generar sobreexcavaciones y/o atrasos, principalmente en aquellas zonas donde los materiales sean de baja calidad mecánica. De igual forma, la inexperiencia en cuanto a su funcionamiento puede provocar algún daño en el producto final de la sección excavada, por ejemplo: perfilado irregular.

**Cuadro 5.10 (cont.)**  
Puntuaciones asignadas a las consecuencias

Identificación	Consecuencia	Puntuación	Justificación
PHCT2 – R8 Fluencia de la roca	1	Despreciable	Para el caso específico del nuevo túnel de Cachi, tales situaciones de riesgo no propician la ocurrencia de atrasos o consecuencias que sean significativos durante el desarrollo de los trabajos de excavación.
PHCT2 – R9 Subsidencias del terreno superficial	1	Despreciable	
PHCT2 – R10 Suelos o rocas expansivas	1	Despreciable	
PHCT2 – R11 Roca explosiva	1	Despreciable	
PHCT2 – R12 Zonas kársticas	1	Despreciable	
PHCT2 – R13 Ocurrencia de un sismo	1	Despreciable	

Según fue indicado anteriormente, el nivel de riesgo se define a partir de la multiplicación de las puntuaciones de probabilidad y consecuencia (ecuación 5-4). Al realizar este cálculo con la información presentada previamente se obtienen los niveles de riesgo mostrados en el Cuadro 5.11.

**Cuadro 5.11**  
Niveles de riesgo

<b>Identificación</b>	<b>Nivel de riesgo</b>
PHCT2 – R1 Condiciones geológicas inesperadas	6
PHCT2 – R2 Inestabilidad del frente de excavación	16
PHCT2 – R3 Flujo de agua hacia el túnel	16
PHCT2 – R4 Avance a través de zonas de falla	16
PHCT2 – R5 Afectación por voladuras	4
PHCT2 – R6 Afectación al túnel existente	8
PHCT2 – R7 Uso de método de excavación nuevo para el ICE	12
PHCT2 – R8 Fluencia de la roca	12
PHCT2 – R9 Subsidiencias del terreno superficial	1
PHCT2 – R10 Suelos o rocas expansivas	1
PHCT2 – R11 Roca explosiva	1
PHCT2 – R12 Zonas kársticas	1
PHCT2 – R13 Ocurrencia de un sismo	1

Con base en los criterios de clasificación definidos en el apartado 5.2 (Cuadro 5.6), se ha procedido a catalogar cada uno de los riesgos, según se muestra en la Figura 5.8.

RIESGO		Puntuación de consecuencias				
		1	2	3	4	5
Puntuación de probabilidad	1	PHCT2-R8 PHCT2-R9 PHCT2-R10 PHCT2-R11 PHCT2-R12 PHCT2-R13				
	2		PHCT2-R5		PHCT2-R6	
	3		PHCT2-R1			
	4			PHCT2-R7	PHCT2-R2 PHCT2-R3 PHCT2-R4	
	5					

**Figura 5.8**  
Clasificación de riesgos

Se observa que el riesgo PHCT2-R7 se clasifica dentro de un nivel considerable, en tanto que los riesgos PHCT2-R2, PHCT2-R3 y PHCT2-R4 se catalogan dentro de un nivel sustancial - intolerable; según los criterios de aceptación definidos para este proyecto, tal clasificación los convierte en los críticos de la etapa de excavación. Por tal motivo, para ellos será preciso llevar a cabo un análisis más detallado que permita establecer medidas para reducir ya sea su probabilidad de ocurrencia y/o el impacto de sus consecuencias, tal como se desarrolla en el siguiente capítulo.

## - Capítulo 6 - MITIGACIÓN Y EVALUACIÓN DE RIESGOS

---

En el presente capítulo se define el plan para la gestión de los riesgos críticos identificados en el capítulo anterior. Para cada uno de ellos se realiza el análisis respectivo, esto con el fin de detallar sus características y establecer las medidas de mitigación más adecuadas. Finalmente, se realiza la evaluación del plan definido, a fin de verificar su efectividad y cumplimiento con los criterios de aceptación del proyecto.

### **6.1 Análisis de riesgos**

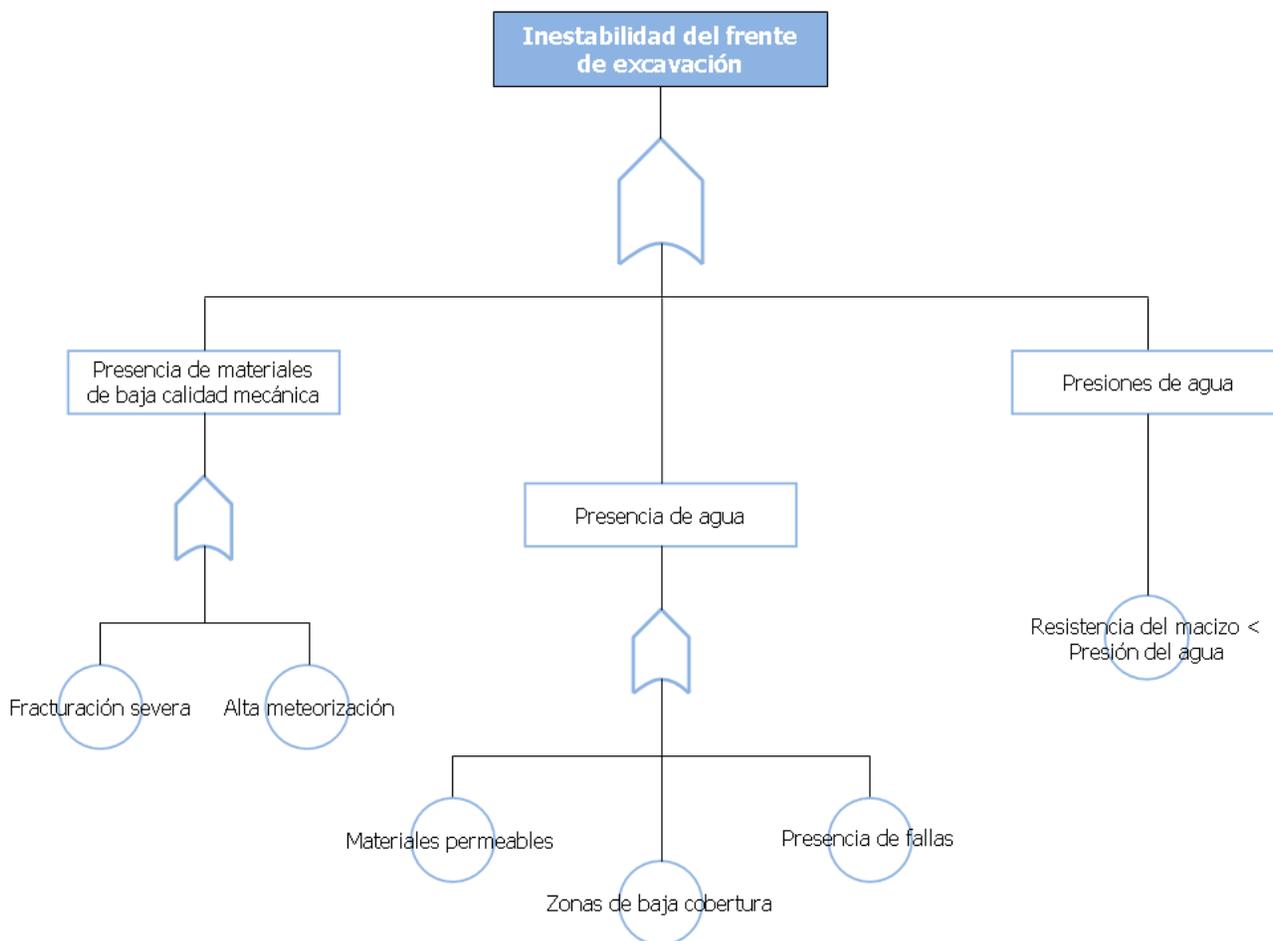
Según se ha comentado, para poder definir medidas de mitigación es necesario llevar a cabo el análisis de cada riesgo, es decir, identificar todas las posibles causas que provocan su ocurrencia y las consecuencias que tal hecho genera. A partir de dicho análisis se facilita el establecimiento de las medidas a tomar, ya que se puede evaluar la factibilidad o conveniencia entre reducir la probabilidad de su ocurrencia o el impacto de sus consecuencias.

En este apartado se desarrolla el análisis de los riesgos considerados como críticos, con base en las metodologías descritas en el Capítulo 2.

#### ***6.1.1 Inestabilidad del frente de excavación***

##### 6.1.1.1 Análisis de causas

Las posibles causas que generan inestabilidades en el frente de excavación se presentan resumidas en el diagrama de la Figura 6.1. Lo presentado aplica para ambos métodos de excavación, ya sea mediante rozadora o perforación y voladura; lo mismo sucede con el análisis de consecuencias, tal como se muestra en el siguiente apartado.

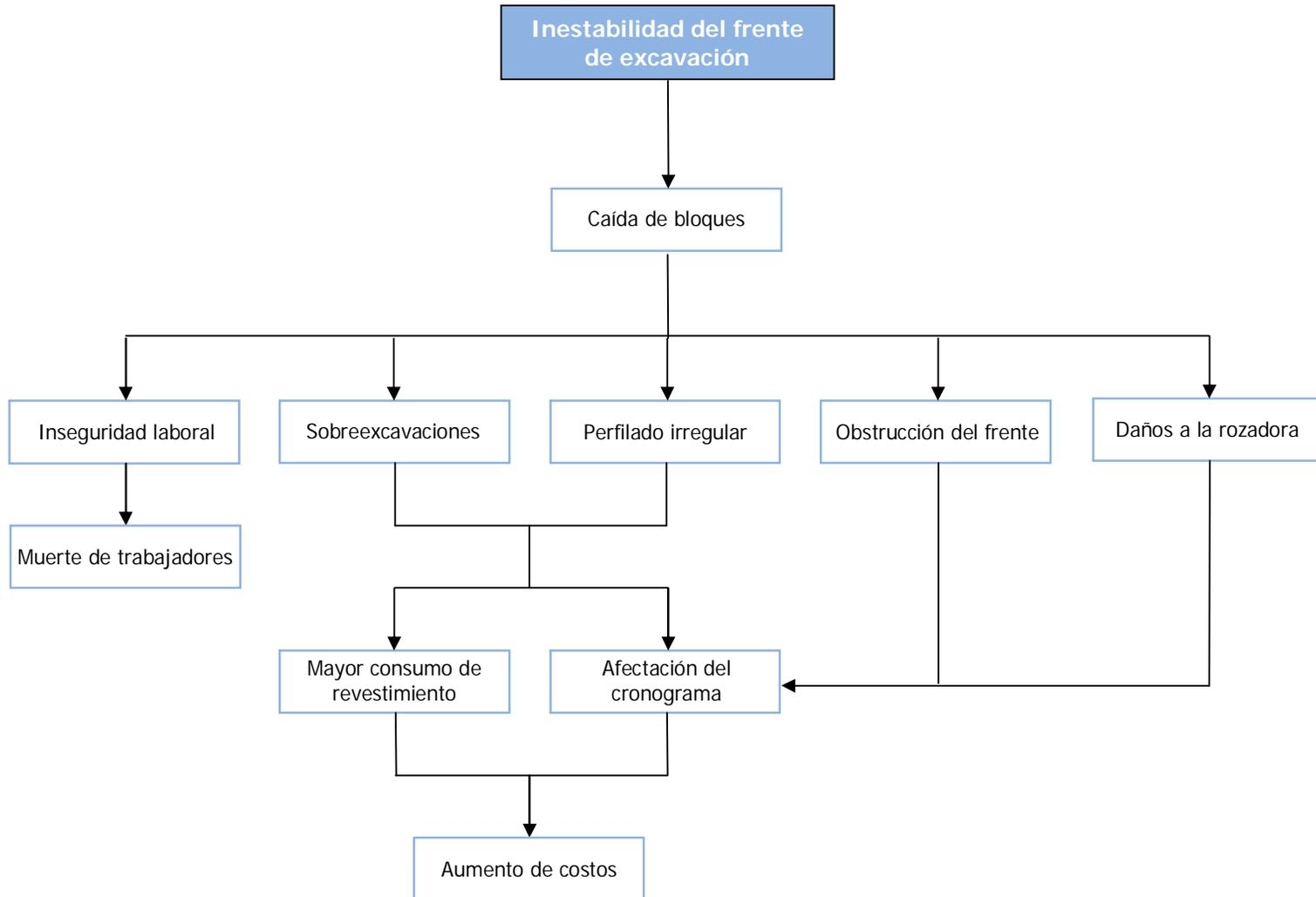


**Figura 6.1**  
Análisis de causas de inestabilidad en el frente de excavación

Conviene resaltar que una causa importante de inestabilidades en el frente de excavación es la existencia de fallas en la línea de túnel, no obstante, en el presente trabajo tal aspecto ha sido considerado como un riesgo en sí mismo debido a la magnitud de la problemática que su presencia puede significar.

#### 6.1.1.2 Análisis de consecuencias

Las consecuencias que las inestabilidades en el frente de excavación provocan se presentan en el diagrama de la Figura 6.2.

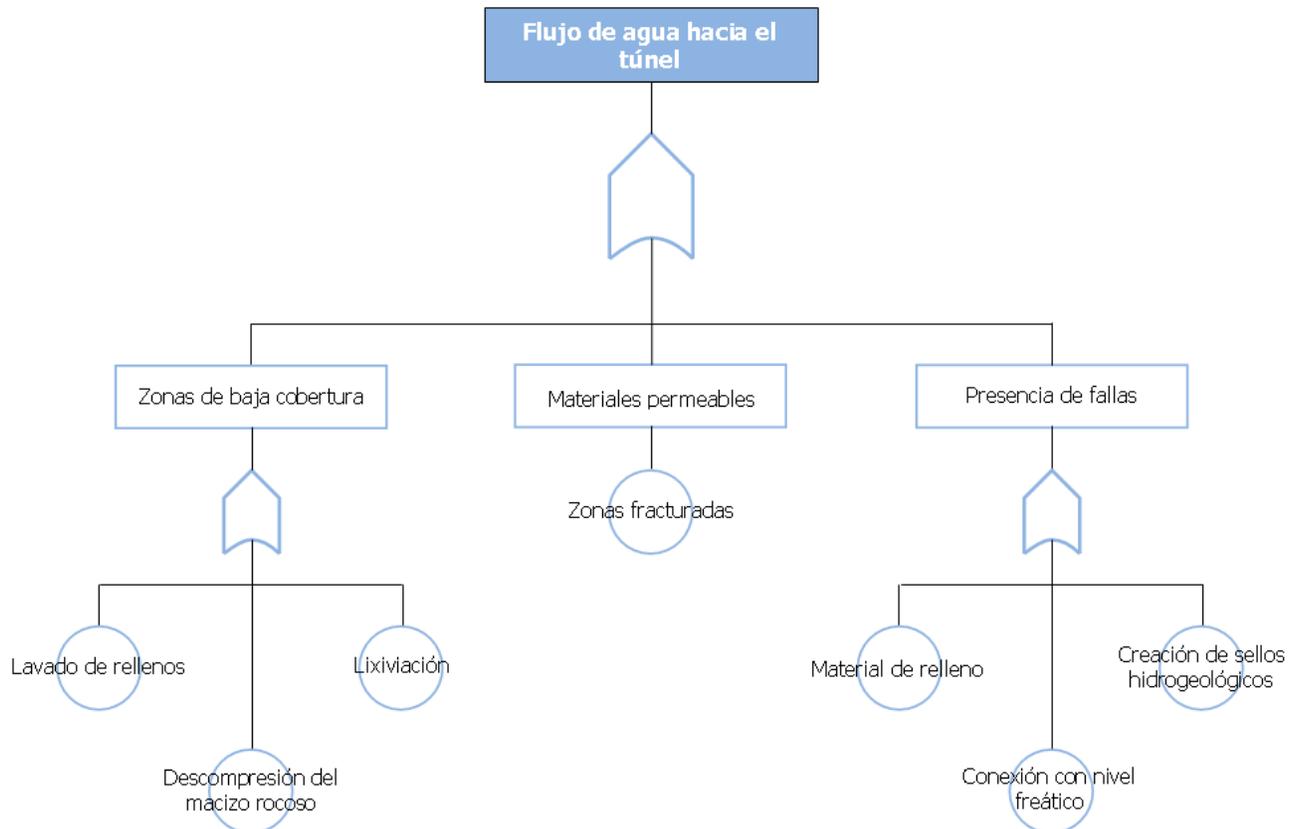


**Figura 6.2**  
Análisis de consecuencias por inestabilidades en el frente de excavación

### 6.1.2 Flujo de agua hacia el túnel

#### 6.1.2.1 Análisis de causas

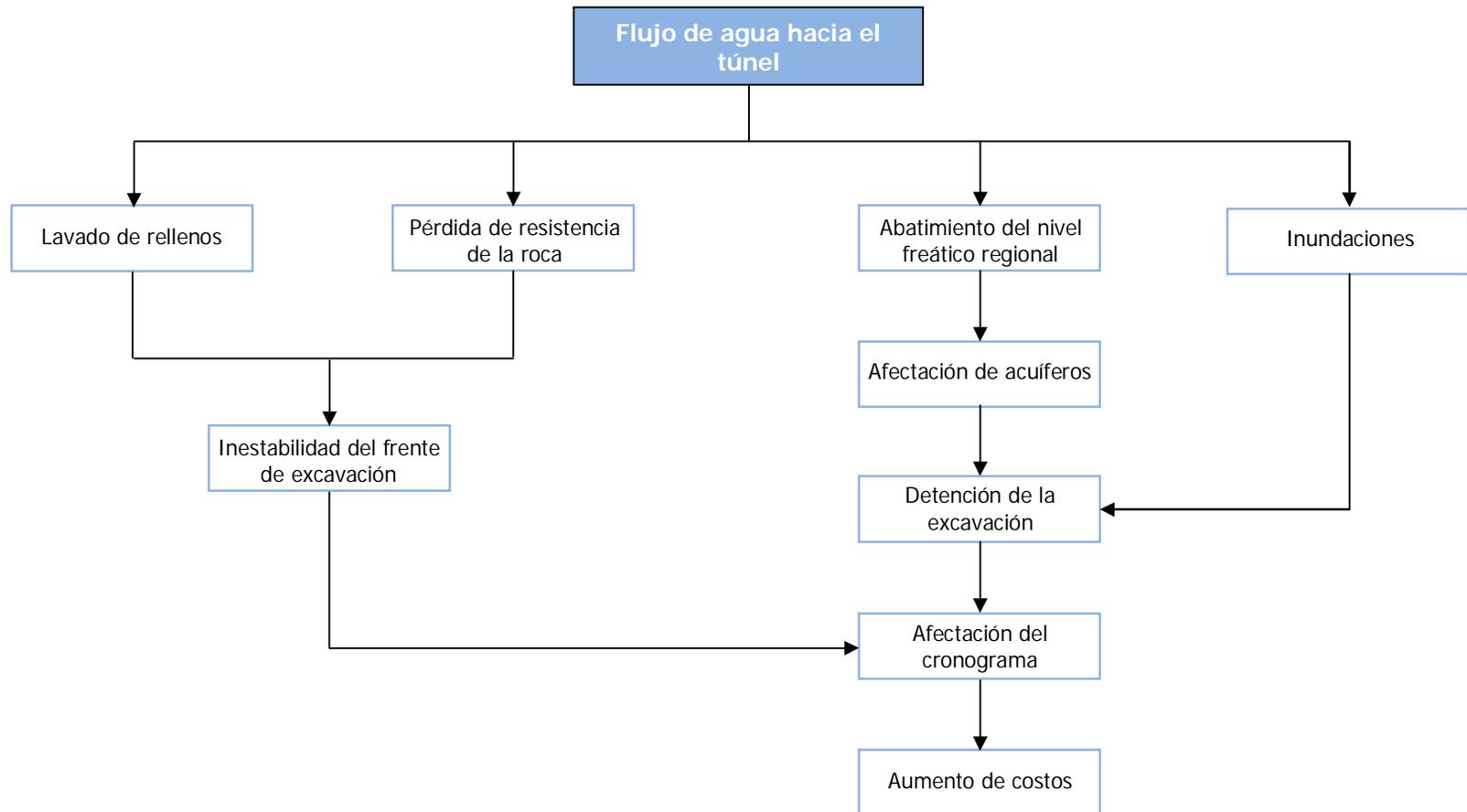
Las causas que provocan la posible presencia de flujo de agua hacia el túnel se presentan en el diagrama de la Figura 6.3.



**Figura 6.3**  
Análisis de causas de flujo de agua hacia el túnel

#### 6.1.2.2 Análisis de consecuencias

Las consecuencias que el flujo de agua hacia el túnel genera se detallan en el diagrama de la Figura 6.4.



**Figura 6.4**  
Análisis de consecuencias por flujo de agua hacia el túnel

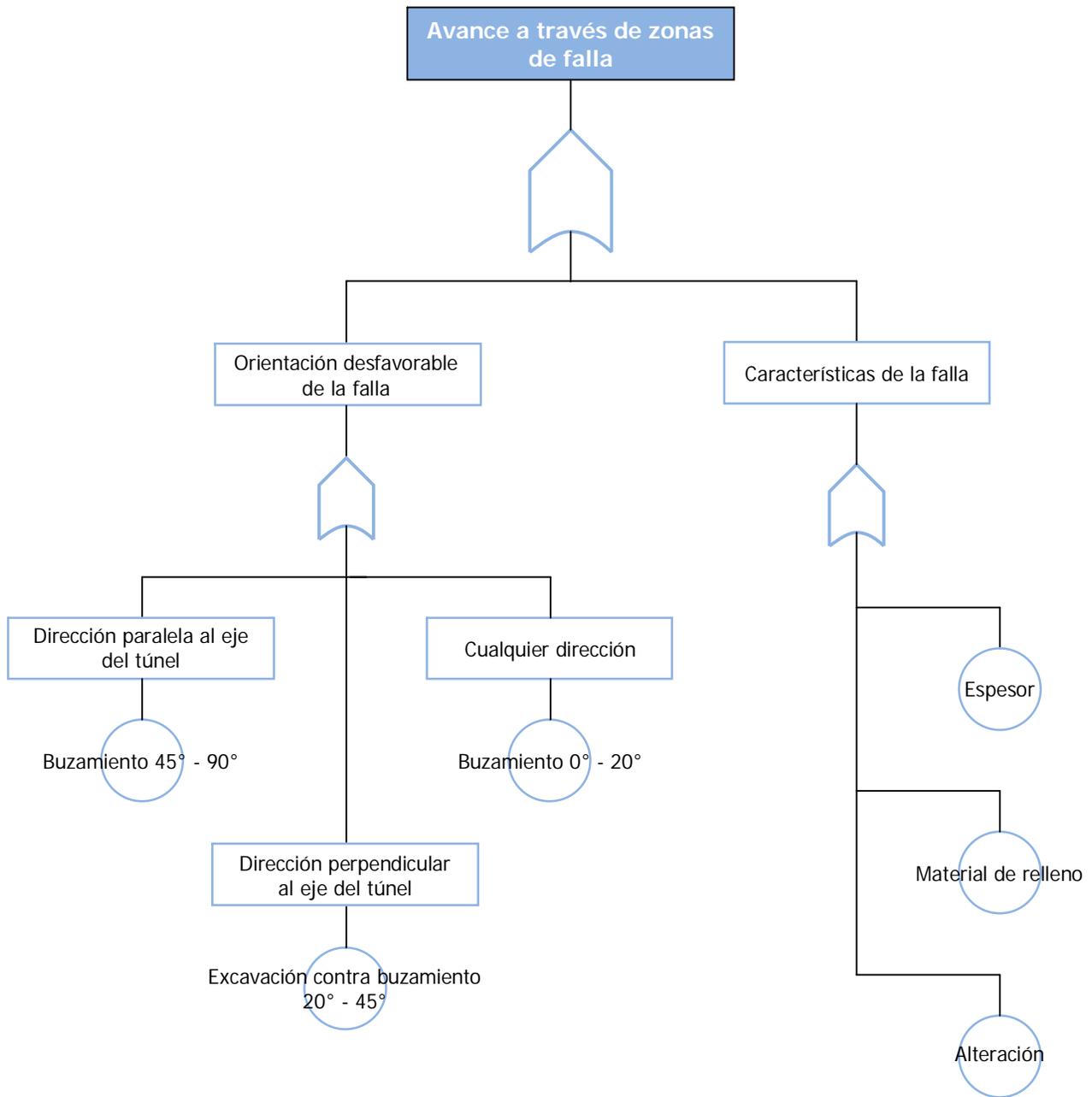
### ***6.1.3 Avance a través de zonas de falla***

#### 6.1.3.1 Análisis de causas

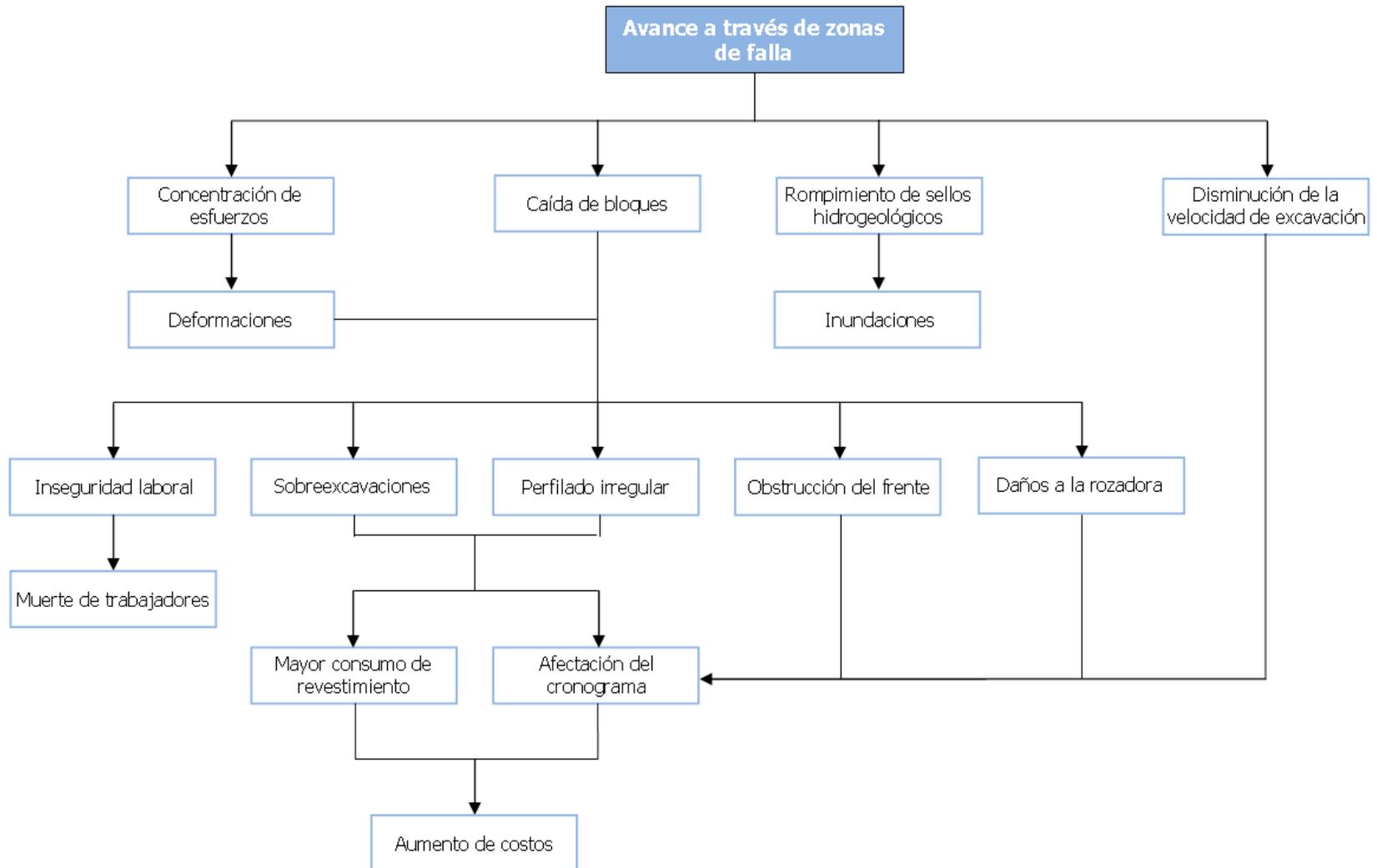
Las causas que provocan que el avance a través de zonas de falla sea un riesgo se presentan resumidas en el diagrama de la Figura 6.5.

#### 6.1.3.2 Análisis de consecuencias

Las consecuencias que se derivan del avance a través de zonas de falla se presentan en el diagrama de la Figura 6.6.



**Figura 6.5**  
Análisis de causas de avance a través de zonas de fallas

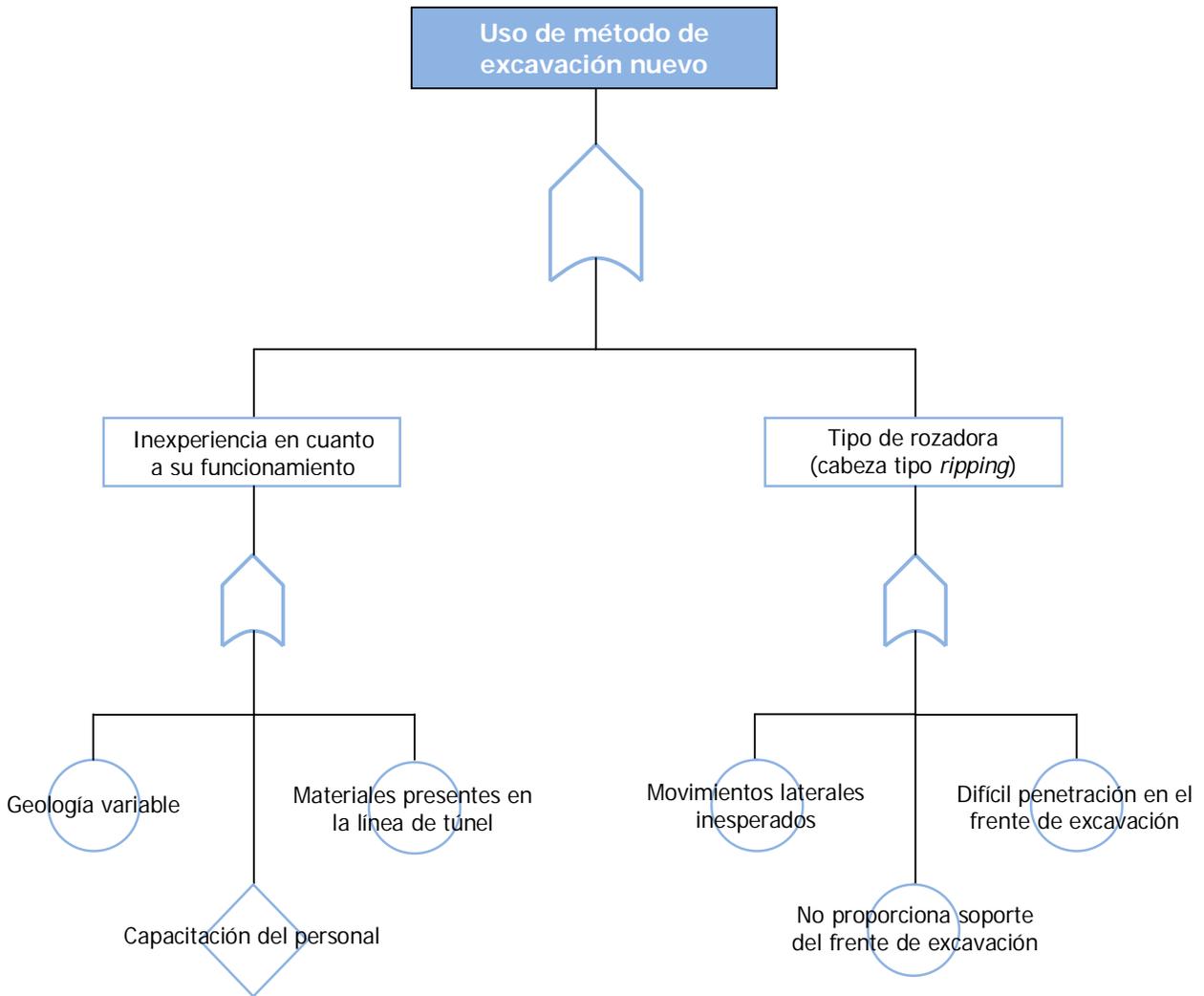


**Figura 6.6**  
Análisis de consecuencias por avance a través de zonas de fallas

### 6.1.4 Uso de método de excavación nuevo para el ICE

#### 6.1.4.1 Análisis de causas

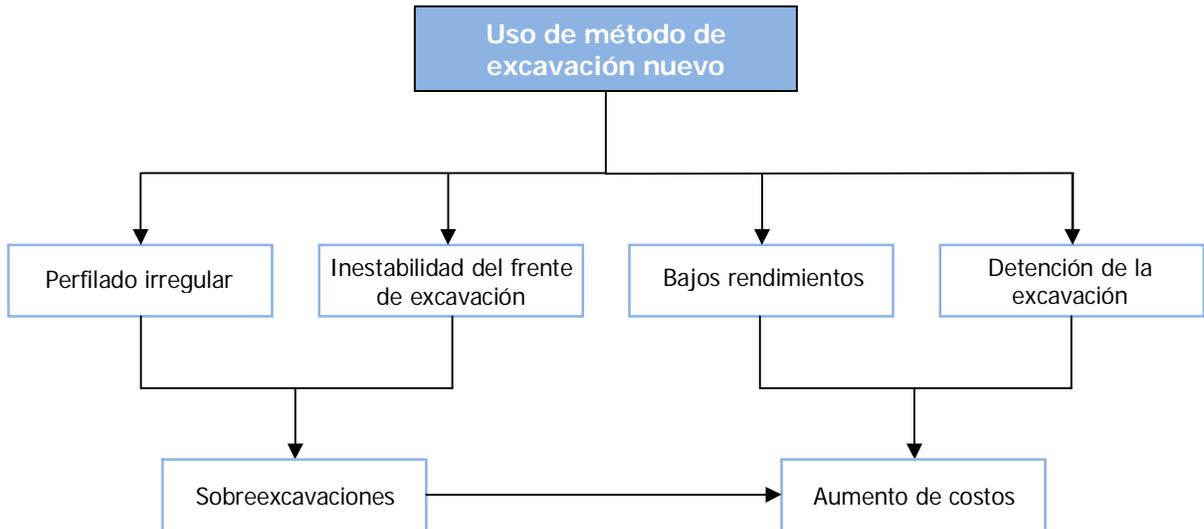
Las causas que provocan que el uso de un nuevo método de excavación sea un riesgo se presentan resumidas en el diagrama de la Figura 6.7.



**Figura 6.7**  
Análisis de causas de uso de método de excavación nuevo

#### 6.1.4.2 Análisis de consecuencias

Las consecuencias que el uso de un nuevo método de excavación genera se presentan en el diagrama de la Figura 6.8.



**Figura 6.8**

Análisis de consecuencias por uso de método de excavación nuevo

## 6.2 Mitigación de riesgos

A partir del análisis realizado en el apartado anterior, se definen las medidas de mitigación más eficaces para cada caso, tomando en cuenta la conveniencia entre reducir las causas que generan el riesgo o disminuir el impacto de sus consecuencias.

### 6.2.1 Inestabilidad del frente de excavación

Para reducir el riesgo de inestabilidad del frente de excavación, conviene aplicar medidas orientadas a minimizar la probabilidad de su ocurrencia, debido a que el impacto de sus consecuencias puede ser de magnitud considerable y de difícil solución. Las medidas propuestas se detallan a continuación y son aplicables tanto en las zonas donde se utilizará la rozadora, como en aquellas donde se aplicarán voladuras como método de excavación.

Conviene mencionar que, en las secciones donde se utilice la rozadora, será necesario retirar esta máquina al aplicar cualquiera de las primeras cuatro soluciones que a continuación se presentan. Esto se debe a que tales medidas requieren el uso de equipos diferentes a la rozadora para su aplicación, los cuales, debido a su tamaño, no pueden ser utilizados si ésta se encuentra en el túnel.

#### 6.2.1.1 Perforaciones al avance

Al realizar perforaciones exploratorias previo al avance de la excavación, es posible identificar con anticipación el tipo de materiales que se excavarán y así confirmar las condiciones previstas durante las etapas anteriores. Además, se pueden prevenir situaciones que no han sido contempladas preliminarmente, en este caso, nuevas zonas de inestabilidad. De esta forma se propicia la continua actualización del modelo geológico – geotécnico.

Las perforaciones se realizan preferiblemente de manera horizontal, más también se pueden ejecutar con cierto ángulo de inclinación cuando se desea corroborar alguna condición geológica en especial (existencia de discontinuidades por ejemplo). Los equipos y métodos varían según el sistema de excavación, pero por lo general, se utilizan máquinas de perforación con recuperación de núcleos, a fin de poder caracterizar los materiales perforados.

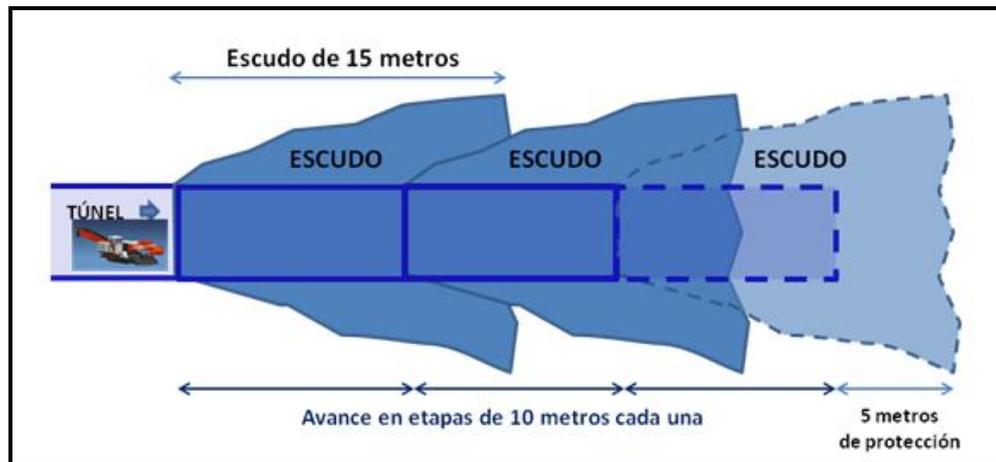
La longitud de las perforaciones se define con base en el avance estimado por ciclo de trabajo, para de esta forma abarcar la totalidad de los materiales que serán excavados. El Cuadro 6.1 muestra, las longitudes de las perforaciones de avance requeridas para un ciclo de trabajo de seis días.

**Cuadro 6.1**  
Estimación de la longitud para las perforaciones al avance

<b>Método de excavación</b>	<b>Rendimiento (m/d)</b>	<b>Avance por ciclo (m)</b>	<b>Longitud de la perforación (m)</b>
Rozadora	10,7	64,2	65,0
Perforación y voladura	6,11	36,7	37,0



La longitud de las perforaciones a realizar es función de la extensión de la zona en la cual se desee aplicar el tratamiento. Una vez aplicado, se procede a la etapa de excavación, dejando una zona sin excavar de 5,0 m al final del tramo tratado, esto como medida de seguridad. La Figura 6.10 ilustra este proceso para perforaciones de 15,0 m de longitud.



**Figura 6.10**

Proceso de avance con inyección

Fuente: Paniagua, 2012

De acuerdo con información del ICE (ICE, 2010), este procedimiento ya ha sido probado en los túneles del P.H. Pirrís y Toro III con éxito. En el caso del P.H. Pirrís, el proceso de inyección permitió excavar el último tramo de túnel con una cobertura de más de 800 m y con una presión superior a los 80 kg/cm<sup>2</sup>.

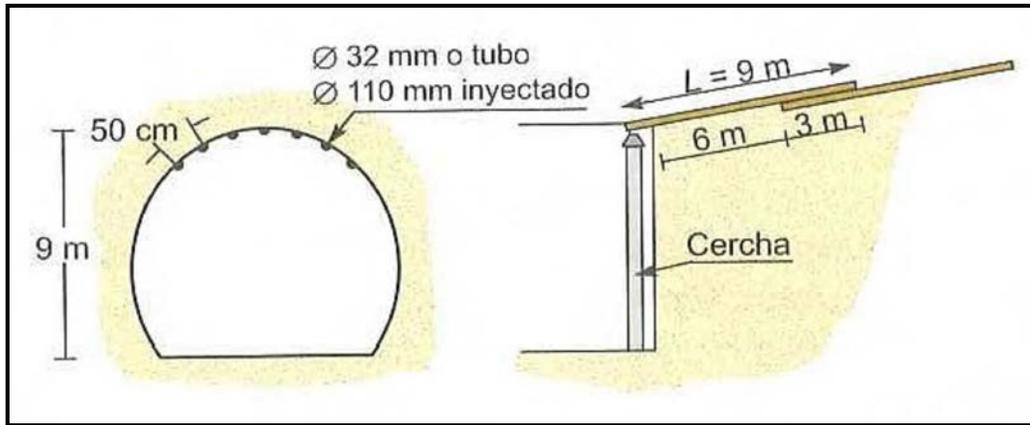
#### 6.2.1.3 Sistema del "paraguas"

El sistema del "paraguas" es un método de estabilización utilizado para atravesar zonas de roca muy fracturada o alterada. Es una técnica muy eficaz ya que permite mantener la estabilidad en la parte superior del túnel.

Consiste en la colocación de un refuerzo previo a la excavación alrededor de la clave del túnel, formando una especie de paraguas, tal como se muestra en la Figura 6.11. Según lo indicado por González et al., como sistema de refuerzo puede utilizarse:

- Pernos (paraguas liviano): barras de acero de 20 mm a 40 mm de diámetro y longitud variable.

- Micropilotes (paraguas pesado): tubos huecos con diámetro entre 102 mm y 150 mm y espesor entre 3 mm y 4 mm, inyectados con lechada de cemento.



**Figura 6.11**

Sistema del "paraguas"

Fuente: González et al., 2002

La longitud y espaciamiento del refuerzo a utilizar se define con base en la condición de estabilidad de los materiales presentes. Cuanto mayor sea su longitud y diámetro, y menor su separación, mejor será su funcionamiento. La inclinación debe ser lo más horizontal posible para evitar que pequeñas cuñas del terreno queden por debajo del refuerzo colocado.

#### 6.2.1.4 Sistemas de sostenimiento

Los sistemas de sostenimiento evitan que el terreno pierda sus propiedades resistentes y que ocurra el desprendimiento de cuñas o zonas sueltas del terreno debido a la excavación. Su aplicación debe realizarse lo antes posible, una vez completada la excavación de la fase correspondiente y dentro del tiempo estimado para el auto soporte del material existente.

Para dimensionar el sostenimiento, debe considerarse la redistribución de presiones en la periferia de la excavación, de manera que el sistema colocado sea capaz de contrarrestar los esfuerzos que se generen. De igual forma, el sostenimiento debe contar con una rigidez tal que permita su deformación hasta alcanzar nuevamente el equilibrio, sin que esto signifique la falla del sistema instalado.

Para el caso del túnel actual, se utilizaron arcos de acero espaciados generalmente a 1,5 m, no obstante, algunos tramos (zonas de roca muy diaclasada o descompuesta) precisaron un menor espaciamiento, del orden de 0,75 m, 1,10 m y 1,35 m. En general, su uso fue requerido en alrededor de un 30% de la longitud del túnel (Cervantes y Granados, 2006), lo que deja entrever que aunque la calidad geomecánica de las rocas es baja, su comportamiento a la estabilidad fue muy bueno. Para el nuevo túnel es de esperar condiciones similares a las anteriormente descritas.

Además de los arcos de acero existen otros sistemas de sostenimiento, los cuales se describen a continuación:

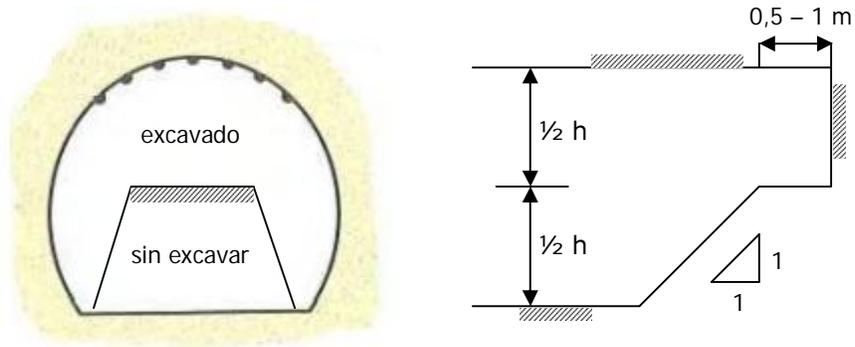
- **Concreto lanzado:** tiene la finalidad de sellar la superficie de la roca y evitar la descompresión y alteración de la misma. Trabaja resistiendo las cargas que el macizo rocoso le transmite al deformarse, evitando la caída de bloques. Los espesores pueden ser menores a 5,0 cm cuando el concreto se utiliza únicamente para el sellado de la excavación; caso contrario, cuando se pretende que funcione como elemento resistente, debe ser reforzado mediante malla electrosoldada o fibras de acero.
- **Malla electrosoldada:** consiste en una parrilla de barras corrugadas unidas mediante electrosoldadura. Se utiliza como refuerzo del concreto lanzado debido a su facilidad de adaptación a la forma del túnel.
- **Anclajes:** se utilizan para "coser" las discontinuidades del macizo rocoso y así evitar los deslizamientos y caídas de bloques. Por su forma de actuar pueden ser activos o pasivos. Los activos se caracterizan por la aplicación de una tensión previa, la cual varía entre 5,0 t y 15,0 t; los pasivos se adhieren a la roca en toda su longitud y no se les aplica tensión.

#### 6.2.1.5 Excavación por fases

Con el fin de mejorar la estabilidad, se puede llevar a cabo la excavación por fases y no de manera completa. Los avances en cada fase deben ser de una longitud adecuada, de forma que se asegure la estabilidad inicial hasta el momento en que se coloque algún sistema de sostenimiento.

Se mencionan dos métodos de excavación por fases:

- Machón central: no se excava todo el frente, sino que se deja un contrafuerte o machón central que soporte los empujes resultantes. La Figura 6.12 ilustra este método.



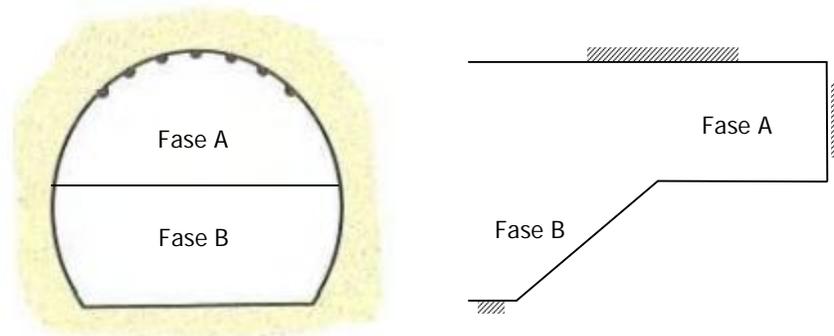
**Figura 6.12**

Sistema de excavación por fases: machón central

Fuente: Rojas, 2009

Modificado por: Marín, 2012

- Excavación a media sección: se excava en mínimo dos secciones, dejando un desfase entre ambas, tal como se muestra en la Figura 6.13.



**Figura 6.13**

Excavación a media sección

Fuente: Rojas, 2009

Modificado por: Marín, 2012

### **6.2.2 Flujo de agua hacia el túnel**

Para reducir el riesgo de flujo de agua hacia el túnel se pueden aplicar medidas enfocadas a la minimización de la probabilidad de ocurrencia, reducción del impacto de las consecuencias o una combinación de ambas. Su establecimiento dependerá de las condiciones deseables durante los trabajos de excavación.

Específicamente para el caso de las consecuencias, las medidas sugeridas se enfocan en la reducción del impacto de las posibles inundaciones y el abatimiento del nivel freático, según se detalla en los siguientes apartados.

#### 6.2.2.1 Perforaciones al avance

Al igual que en el caso de las zonas de inestabilidad, al realizar perforaciones previo al avance de la excavación es posible confirmar la presencia del agua en aquellas zonas donde tal condición ha sido pronosticada; además, se puede identificar con anticipación nuevas secciones en las que el agua podría representar un problema y tomar las medidas necesarias para su manejo.

Es importante destacar que las perforaciones al avance, además de su función de prevención, también pueden funcionar como un método de alivio de presiones. Lo anterior debido a que al realizar la perforación, se crea un conducto de salida para el agua, evitando que ésta se presente como un flujo repentino al momento de llevar a cabo la excavación.

#### 6.2.2.2 Tratamiento con inyección

De acuerdo con lo indicado en el apartado 6.2.1.2, una de las funciones del tratamiento con inyección puede ser la de impermeabilización, en cuyo caso se propicia una reducción de la permeabilidad del macizo rocoso y por ende, se disminuye el posible flujo de agua que se podría presentar durante la excavación.

Las sugerencias brindadas anteriormente para la aplicación de este método funcionan de igual manera para el tratamiento de las zonas con posibles flujos de agua.

#### 6.2.2.3 Construcción de acueductos

Según se ha mencionado, las filtraciones de agua hacia el túnel pueden provocar el abatimiento del nivel freático regional, lo que a su vez podría afectar los acuíferos de la zona y generar molestias en la población. Aún cuando dicha situación no se presentó durante la excavación del túnel actual, sí fue un problema de magnitud importante durante la construcción de la Central Hidroeléctrica La Joya (ICE, 2010), ubicada cerca de la Planta de Cachí y dentro del mismo ambiente geológico.

Debido a lo anterior, se considera importante la habilitación de un suministro alternativo de agua a las poblaciones cercanas al proyecto, con el fin de evitar posibles molestias, mismas que podrían significar la detención de la excavación.

#### 6.2.2.4 Sistemas de bombeo

La presencia incontrolada de agua dentro del túnel puede provocar inundaciones, las cuales, de acuerdo con su magnitud, pueden llegar a detener los trabajos de excavación. Por tal motivo, se hace necesaria la implementación de sistemas que recojan el agua filtrada y la lleven a puntos controlados donde sistemas de bombeo la conduzcan fuera del túnel.

Es necesario que se lleve a cabo un adecuado diseño del sistema de bombeo que se implemente, ya que cualquier falla en este sistema supone la inundación del túnel y por ende, retrasos en la actividad de excavación.

### **6.2.3 Avance a través de zonas de falla**

Las zonas de falla pueden considerarse un caso crítico de las inestabilidades en el frente de excavación, por tal motivo, las medidas sugeridas en el apartado 6.2.1 pueden también ser implementadas para minimizar el riesgo existente por la presencia de dichas zonas. No obstante, conviene mencionar que finalmente serán las características de la falla las que definirán la medida más conveniente a aplicar.

Considerando lo anterior, en el presente apartado se realizan observaciones adicionales para algunas de las medidas propuestas en la sección 6.2.1, de manera que su aplicación sea efectiva para el tratamiento de las zonas de falla.

#### 6.2.3.1 Perforaciones al avance

Tal como fue mencionado en la sección 6.2.1.1, las perforaciones al avance permiten realizar la actualización del modelo geológico – geotécnico, de manera que se corroboren las condiciones previstas durante el diseño.

Para el caso específico de las fallas, las perforaciones permiten no sólo confirmar su existencia, sino que además determinar su espesor y el tipo de materiales de relleno que poseen. De igual forma, es posible prever la presencia de nuevas fallas, mismas que no han podido ser identificadas en etapas preliminares.

#### 6.2.3.2 Tratamiento con inyección

El uso de inyecciones con lechada de cemento se justifica cuando la falla detectada presente al menos dos de las siguientes características (Soto, 1974):

- Fracturas en la roca cada 25,0 cm o menos.
- Presencia de arcilla en cantidad tal que impide el drenaje del agua.
- Caudales de agua superiores a 25 l/s.
- Presión de agua superior a 15 kg/cm<sup>2</sup>.

Cuando se tratan zonas de falla con este método es recomendable llevar a cabo el proceso por tramos cortos (3, 4 ó 5 metros). De esta manera se logra una estabilización más confiable, se tiene un mayor control sobre el trabajo realizado y el progreso es más fácil de visualizar.

#### 6.2.3.3 Sistemas de sostenimiento

Para estabilizar la roca en zonas de falla, se puede utilizar alguno de los sistemas indicados en el apartado 6.2.1.4. No obstante, dadas las características que estas zonas presentan, resulta más conveniente realizar una estabilización por secciones, cuyo número dependerá del grado de inestabilidad que presente la roca.

Considerando lo mencionado en el párrafo anterior y tomando como base la experiencia del ICE en la excavación de túneles, se describen dos tipos de sostenimiento a base de arcos de acero, utilizados comúnmente por esta institución:

- Arco tipo 2: permite realizar la excavación del túnel en dos secciones, una superior y otra inferior. Generalmente, se utiliza cuando la falla presenta alguna de las siguientes características (Soto, 1974):
  - Condición de la roca varía de blocosa a muy diaclasada y con meteorización avanzada en partes.
  - Distancia entre fracturas variable entre 10,0 cm y 25,0 cm.
  - Presencia de arcilla entre las discontinuidades, en espesores de 5,0 cm a 30,0 cm.
  - Caudales de agua de hasta 30 l/s.
  - Presión de agua no mayor a 10 kg/cm<sup>2</sup>.

Según se mencionó, el proceso de excavación se realiza en dos secciones. Primero se hace la estabilización en la sección superior, la cual consiste en excavar, extraer el material y colocar las piezas correspondientes del soporte. Posteriormente, se ejecuta el mismo proceso en la sección inferior, dejando como mínimo un desfase de 3,0 m entre ambas secciones.

- Arco tipo 3: permite realizar la excavación del túnel en cuatro secciones, tres superiores y una inferior. Generalmente, se utiliza cuando la falla presenta alguna de las siguientes características (Soto, 1974):
  - Condición de la roca varía de triturada a descompuesta químicamente a suelo.
  - Distancia entre fracturas no mayor a 10,0 cm.
  - Presencia de arcilla en cantidades considerables.
  - Caudales de agua mayores a 30 l/s, siempre que la presión de agua no supere los 10 kg/cm<sup>2</sup>.

Al igual que el tipo de arco anterior, este sistema también permite avanzar la excavación con "banco" a la mitad de la altura del túnel. La diferencia es que la parte superior se excava y estabiliza en tres secciones: una central y dos laterales, iniciando el proceso a través de la sección central y luego de manera simultánea en las laterales. Para este caso, las secciones deben tener un desfase entre 4,0 m y 5,0 m, tanto entre la sección central y las laterales, y entre éstas con la sección inferior.

Conviene resaltar que existen más tipos de arcos, los cuales permiten llevar a cabo la excavación en más secciones. Su uso depende de las condiciones de la falla, es decir, entre más críticas sean sus características, será necesario un mayor número de secciones para poder excavar sin grandes contratiempos a través de la falla.

#### 6.2.3.4 Túnel piloto

En aquellos casos en el que el avance a través de una zona de falla represente una labor de gran dificultad, puede optarse por la desviación del alineamiento planteado para el túnel, lo cual se conoce como la excavación de un túnel piloto.

Con dicha desviación se evita que la excavación atravesase materiales de baja calidad mecánica o que representen potenciales problemas; no obstante, es necesario que exista un adecuado conocimiento de las condiciones presentes en la nueva sección a excavar, de manera que se tenga la certeza de que las características de los materiales son mejores que las que se desean evitar y no propician la ocurrencia de nuevos riesgos. Además, se debe llevar a cabo un control topográfico pertinente, que permita que el nuevo alineamiento coincida de forma adecuada con el túnel proveniente de otro frente de excavación.

#### **6.2.4 Uso de método de excavación nuevo para el ICE**

El riesgo de utilizar una máquina nueva para los trabajos de excavación se puede reducir a través de medidas que se enfoquen en las causas que lo originan. En este sentido, se mencionan las siguientes:

- Realizar una capacitación continua del personal sobre el manejo de la rozadora, de manera que exista un conocimiento preciso sobre su funcionamiento y comportamiento durante su aplicación en el nuevo túnel.
- Disponer del método tradicional de perforación y voladura, el cual es un método bien conocido por el personal del ICE y puede emplearse en caso de que el uso de la rozadora no sea tan eficiente o presente rendimientos menores que los esperados.
- Llevar a cabo un registro de los rendimientos obtenidos en cada sección del túnel, tomando en cuenta el tipo de material encontrado y los posibles problemas presentes.

De esta forma, se abre la posibilidad de mantener un control detallado de la rozadora y evaluar su comportamiento en la geología presente. Una propuesta para este tipo de registro se muestra en el Apéndice A.

La utilización de este documento permite no sólo monitorear el desempeño de la rozadora, sino que además permite prever su comportamiento a lo largo del túnel, esto por cuanto la experiencia obtenida en una sección, es un indicativo del comportamiento esperable para otra zona de condiciones similares. Lo anterior toma especial importancia en las secciones problemáticas, ya que al conocer de antemano el funcionamiento de la rozadora en estas zonas, es posible aplicar medidas alternativas, como por ejemplo, el uso del método de perforación y voladura.

Es importante mencionar que a través del continuo uso de la rozadora como método de excavación a lo largo del túnel, se irá aprendiendo más sobre su funcionamiento y la experiencia irá aumentando, por lo que es de esperar que el riesgo asociado a su empleo sea cada vez menor.

### **6.3 Evaluación de riesgos**

Según fue mencionado en el Capítulo 2, como parte del proceso a seguir es necesario realizar una evaluación de los riesgos, es decir, verificar que el procedimiento llevado a cabo hasta el momento sea efectivo y satisfaga los criterios de aceptación definidos para el proyecto. En este sentido, se tienen dos subprocesos, los cuales se detallan a continuación en los siguientes apartados.

#### ***6.3.1 Evaluación general del proceso***

Es necesario llevar a cabo una revisión general de cada uno de los pasos que se han completado hasta el momento, de manera que se constate que éstos se han aplicado de forma correcta y sin dejar de lado algún punto importante que pudiera afectar la efectividad del proceso.

Uno de los puntos de mayor relevancia dentro de esta evaluación es verificar que se hayan identificado todos los posibles riesgos asociados a la excavación del nuevo túnel. Para esto, se ha revisado nuevamente la lista de riesgos frecuentes en excavaciones

subterráneas presentada en el Capítulo 5 (apartado 5.1.1) y, junto con las condiciones geológicas y geotécnicas del proyecto, se determinaron los que podrían incidir en la excavación del nuevo túnel. A través de este procedimiento se ha verificado que todos los posibles riesgos han sido efectivamente identificados, por lo que en este sentido, este paso se ha completado correctamente.

De igual forma, es preciso confirmar que cada uno de los riesgos clasificados como los críticos del proyecto tenga asociadas medidas para su mitigación. Al igual que en el caso anterior, se ha hecho una revisión detallada de lo presentado en el apartado 6.2, corroborando que en efecto, para cada riesgo se han sugerido medidas para su mitigación.

### ***6.3.2 Evaluación de los resultados obtenidos***

Es imprescindible verificar que las medidas de mitigación establecidas realmente conduzcan a niveles de riesgo aceptables. En este sentido, es necesario asignar de nuevo puntuaciones para la probabilidad e impacto de las consecuencias, a fin de poder comparar el nivel de riesgo resultante con los criterios de aceptación del proyecto.

Nuevamente se ha empleado la información propuesta por Yoo (2006) para la asignación de puntuaciones, misma que fue presentada con anterioridad en los Cuadros 5.7 y 5.8 del Capítulo 5. Las nuevas puntuaciones para cada uno de los riesgos críticos se presentan a continuación en los Cuadros 6.2 y 6.3.

**Cuadro 6.2**  
Puntuaciones asignadas a la probabilidad

Identificación	Probabilidad	Puntuación	Justificación
PHCT2 – R2 Inestabilidad del frente de excavación	Remota	2	Se han establecido medidas para minimizar la probabilidad de su ocurrencia, esto por cuanto las alternativas propuestas se enfocan en la mejora de las condiciones del terreno. Además, de acuerdo con lo indicado en el informe de Cervantes y Granados, el comportamiento a la estabilidad del macizo durante la excavación del primer túnel fue muy bueno (aproximadamente sólo un 30% de la longitud del túnel requirió soporte), por lo que podrían esperarse las mismas condiciones durante la excavación del nuevo túnel.
PHCT2 – R3 Flujo de agua hacia el túnel	Remota	2	Al reducir la permeabilidad del macizo rocoso en zonas donde se espera la presencia del agua, se disminuye la probabilidad de que se presenten filtraciones durante los trabajos de excavación. Tal condición, unido con el hecho de que los materiales en general son de características poco permeables, hace que exista poca posibilidad de que se presenten problemas por flujo de agua hacia el túnel.
PHCT2 – R4 Avance a través de zonas de falla	Remota	2	Al igual que en el caso de inestabilidad del frente de excavación, se han asignado medidas que permitan el avance seguro a través de las zonas de falla y que además, se pueda identificar su presencia de previo a la excavación. Por tal motivo, la posibilidad de que se presenten problemas debido a la presencia de fallas es poca.
PHCT2 – R7 Uso de método de excavación nuevo para el ICE	Ocasional	3	Las medidas establecidas para minimizar el riesgo del uso de un método de excavación nuevo propician que su empleo no signifique un atraso importante en el cronograma de la obra. No obstante, durante su uso en los primeros metros de excavación y en zonas donde se presenten cambios de material, podrían presentarse problemas por tratarse de secciones en las que el personal se irá adaptando al funcionamiento de la máquina, motivo por el cual existe la posibilidad de que al menos una vez se presenten problemas durante la excavación.

**Cuadro 6.3**  
Puntuaciones asignadas a las consecuencias

Identificación	Consecuencia	Puntuación	Justificación
PHCT2 – R2 Inestabilidad del frente de excavación	Seria	3	Al disminuir la probabilidad de ocurrencia del riesgo disminuye también la intensidad de sus consecuencias. Lo anterior debido a que se propicia una mejora en las condiciones del macizo, lo que en este caso se traduce como una disminución de la caída de bloques dentro del túnel. Se considera que, de presentarse algún problema de estabilidad, los daños serán manejables y no representarán atrasos significativos.
PHCT2 – R3 Flujo de agua hacia el túnel	Seria	3	Según se ha mencionado, algunas de las medidas establecidas se enfocan específicamente a la reducción de las consecuencias que este riesgo genera, por lo que no es de esperar daños o retrasos significativos asociados a tales hechos. No obstante, la presencia inesperada del agua podría modificar dicha condición, por lo que se mantiene la posibilidad de que se genere algún daño o retraso durante la excavación.
PHCT2 – R4 Avance a través de zonas de falla	Seria	3	Las fallas pueden tratarse como un caso especial de las zonas de inestabilidad, por lo que pueden esperarse resultados similares a los pronosticados para dichas zonas. De igual forma, al conocer previamente su localización, se puede actuar eficientemente y así evitar daños considerables en la excavación del túnel.
PHCT2 – R7 Uso de método de excavación nuevo para el ICE	Moderada	2	Según se ha mencionado, es de esperar que el riesgo de utilizar un equipo nuevo se vaya reduciendo conforme se avance en la excavación del túnel, debido a que la experiencia en cuanto a su uso será cada vez mayor. Por tal motivo, es posible que los daños ocasionados por su uso sean cada vez menores.

A partir de dichas puntuaciones se calcula el nivel de riesgo resultante, el cual se obtiene de la multiplicación de la probabilidad por el impacto de las consecuencias. Por ejemplo, para el riesgo PHCT2 – R2, el cálculo sería de la siguiente forma:

$$R = P \times I$$

$$R = 2 \times 3$$

$$R = 6$$

Del mismo modo se han obtenido los resultados para los riesgos PHCT2 – R3, PHCT2 – R4 y PHCT2 – R7. Los mismos se muestran en el Cuadro 6.4 y se presentan de manera gráfica en la Figura 6.14 (resaltados en negrita).

**Cuadro 6.4**  
Niveles de riesgo

<b>Identificación</b>	<b>Nivel de riesgo</b>
PHCT2 – R2 Inestabilidad del frente de excavación	6
PHCT2 – R3 Flujo de agua hacia el túnel	6
PHCT2 – R4 Avance a través de zonas de falla	6
PHCT2 – R7 Uso de método de excavación nuevo para el ICE	6

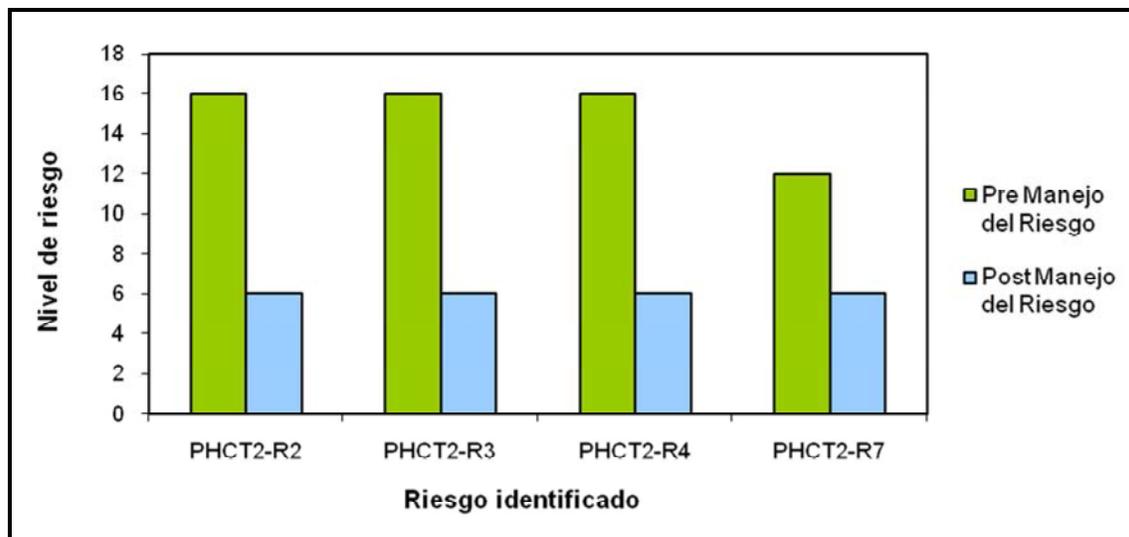
RIESGO		Puntuación de consecuencias				
		1	2	3	4	5
Puntuación de probabilidad	1	PHCT2-R8 PHCT2-R9 PHCT2-R10 PHCT2-R11 PHCT2-R12 PHCT2-R13				
	2		PHCT2-R5	PHCT2-R2 PHCT2-R3 PHCT2-R4	PHCT2-R6	
	3		PHCT2-R1 PHCT2-R7			
	4					
	5					

**Figura 6.14**  
Clasificación de riesgos

Con base en la nueva clasificación de riesgos, es posible comparar los resultados con los niveles de riesgo iniciales, es decir, los obtenidos antes de aplicar las medidas de mitigación. Tal comparación se muestra en el Cuadro 6.5 y se ilustra de manera gráfica en la Figura 6.15.

**Cuadro 6.5**  
Comparación de niveles de riesgo

Identificación	Nivel de riesgo			
	Pre manejo del riesgo		Post manejo del riesgo	
PHCT2 - R2 Inestabilidad del frente excavación		16		6
		Sustancial		Menor
PHCT2 - R3 Flujo de agua hacia el túnel		16		6
		Sustancial		Menor
PHCT2 - R4 Avance a través de zonas de falla		16		6
		Sustancial		Menor
PHCT2 - R7 Uso de método de excavación nuevo para el ICE		12		6
		Considerable		Menor



**Figura 6.15**  
Comparación de niveles de riesgo

Según se observa, a partir de la aplicación de medidas de mitigación, ha sido posible conducir los riesgos críticos a la categoría de riesgo "menor", lo cual se considera un nivel aceptable de acuerdo con los criterios de aceptación definidos para este proyecto. Con base en lo anterior, se establece que la actividad de excavación puede llevarse a cabo sin mayores contratiempos debido a que se cuenta con un perfil de riesgos debidamente definido y tolerable.

No obstante, en aras de asegurar el cumplimiento de las medidas establecidas y verificar su eficiencia, es preciso transferir la información obtenida hacia la siguiente etapa, es decir, la construcción del túnel. A partir de una adecuada recopilación de la información es posible llevar a cabo el seguimiento de los riesgos identificados, de manera que se incentive la aplicación del proceso a lo largo de las etapas restantes del proyecto.

Con el fin de recopilar la información obtenida en el presente trabajo, se introduce el concepto de "registro del riesgo". Como bien lo dice su nombre, se trata de documentos en los cuales se reúne la descripción y demás detalles de los riesgos identificados durante el proceso realizado. De manera general, contiene la siguiente información:

- Identificación o nomenclatura del riesgo, a fin de proporcionar un factor de ordenamiento en la documentación.
- Nombre del riesgo.
- Puntuaciones de probabilidad y consecuencia asignadas al riesgo.
- Nivel de riesgo.
- Medidas de mitigación establecidas (en caso de ser necesario).
- Nivel de riesgo resultante después de la aplicación de las medidas de mitigación.

En el Apéndice B se muestran los registros de los riesgos identificados en este proyecto. Se han incluido tanto los riesgos críticos como los que no lo son, de manera que lo obtenido en este proceso sea transferido completamente a la etapa de construcción y pueda ser verificado y/o actualizado durante dicha fase.

## - Capítulo 7 - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

A partir del proceso de manejo del riesgo llevado a cabo en este proyecto, se presentan en este capítulo las conclusiones derivadas de dicha gestión. De igual manera, se introducen las recomendaciones a seguir con el fin de asegurar el éxito de la aplicación de esta metodología, así como su continua mejora.

### 7.1 Conclusiones

- El riesgo y la incertidumbre, junto con las posibles consecuencias que se pueden generar, son aspectos inherentes a cualquier proyecto de Ingeniería Civil, de ahí la importancia de contar con una herramienta que permita generar un mayor control sobre dichos aspectos.
- Según se ha podido constatar a lo largo de este trabajo, los factores geotécnicos son condicionantes de un proyecto, ya que su incidencia puede afectar el desarrollo o incluso la viabilidad del mismo. Por tal motivo, los riesgos que se deriven de tales factores no pueden ser ignorados, en la medida de lo posible deben ser manejados, minimizados, mitigados, compartidos o transferidos.
- Una adecuada gestión del riesgo implica identificar situaciones de peligro antes de que éstas ocurran, lo cual permite que el proyecto se desarrolle con la menor cantidad de imprevistos posible. Tal aspecto se traduce en ahorro de tiempo y dinero, es decir, permite que el proyecto se mantenga dentro del cronograma y presupuesto establecidos.
- Los principales beneficios o ventajas obtenidos del manejo del riesgo realizado son los siguientes:
  - Identificación temprana de los riesgos, lo que permite establecer la relevancia que cada uno de ellos representa dentro del proyecto.
  - Permite una toma de decisiones más acertada debido a que la atención se enfoca en los riesgos críticos.

- Proporciona un mejor entendimiento del proyecto ya que se plantean los posibles escenarios bajo los cuales éste se desarrollará y su respuesta ante las condiciones que lo afectan.
- El manejo del riesgo en túneles no requiere el uso de tecnologías especiales. Sin embargo, es necesaria la aplicación de conocimientos técnicos en el área correspondiente, de forma que el riesgo sea mínimo durante todas las fases del proyecto y se lleve a cabo una toma de decisiones acertada.
- De acuerdo con las condiciones geológicas y geotécnicas del túnel estudiado, se han identificado los riesgos que pueden afectar el correcto desarrollo de los trabajos de excavación. Tales riesgos se presentan en el Cuadro 7.1.

**Cuadro 7.1**  
Riesgos asociados a la excavación del túnel

<b>Riesgo</b>	<b>Identificación <sup>(1)</sup></b>
Condiciones geológicas inesperadas	PHCT2 – R1
Inestabilidad del frente de excavación	PHCT2 – R2
Flujo de agua hacia el túnel	PHCT2 – R3
Avance a través de zonas de falla	PHCT2 – R4
Afectación por voladuras	PHCT2 – R5
Afectación al túnel existente	PHCT2 – R6
Uso de método de excavación nuevo para el ICE	PHCT2 – R7

<sup>(1)</sup> PHCT2 = Proyecto Hidroeléctrico Cachí Túnel 2

- Existe la posibilidad de que los riesgos identificados sean menores o mayores a los considerados en este trabajo, debido principalmente a cambios entre la información manejada por el ICE y las condiciones reales que se presenten durante la excavación. No obstante, lo aquí mostrado es un precedente de las situaciones de riesgo que pueden existir al momento de llevar a cabo los trabajos de excavación del nuevo túnel.  
  
Es importante tener claro que los riesgos son dependientes del tiempo y del espacio, lo cual puede provocar la variación antes mencionada. En relación con el tiempo, la dependencia entre este aspecto y el riesgo radica en el momento en que la atención se

brinde, es decir, el período en el que se trate el riesgo en caso de ser necesario. En cuanto al espacio, la variación de las condiciones geológicas propicia que las causas que generan un riesgo determinado en una zona no sean las mismas que lo provocan en otra sección de condiciones similares, lo cual incide directamente sobre el nivel de riesgo que se podría presentar.

- A partir de la asignación de puntuaciones de probabilidad e impacto de consecuencias, se definió el nivel de riesgo correspondiente a cada uno de los riesgos identificados. La Figura 7.1 muestra el detalle de lo obtenido para todo el perfil del nuevo túnel.
- Con base en la caracterización de riesgos realizada se obtuvieron los críticos del proyecto, es decir, los que se clasificaron dentro de las categorías de riesgo considerable y sustancial. Tales riesgos son:
  - Inestabilidad del frente de excavación.
  - Flujo de agua hacia el túnel.
  - Avance a través de zonas de falla.
  - Uso de método de excavación nuevo para el ICE.
- A partir del análisis de causas y consecuencias realizado para cada riesgo crítico, se ha definido la conveniencia entre mitigar su probabilidad de ocurrencia y/o el impacto de sus consecuencias. Con base en lo anterior, se estableció el plan requerido para la reducción de cada uno de estos riesgos, tal como se muestra en el Capítulo 6 de este trabajo.
- De acuerdo con la evaluación de riesgos llevada a cabo, se ha encontrado que con la aplicación del plan de mitigación es posible reducir los niveles de riesgo iniciales y conducirlos a niveles tolerables que puedan ser fácilmente controlados durante la etapa de excavación. La reducción de la que se hizo mención se muestra en el Capítulo 6 del presente trabajo.



- Con la adecuada aplicación del manejo del riesgo se logrará que al pasar a la etapa de excavación se controlen únicamente los riesgos residuales, es decir, los resultantes de aplicar las medidas de mitigación establecidas. La idea es que la ocurrencia de riesgos durante la excavación del túnel no sea una sorpresa, sino más bien un proceso de control de situaciones previamente identificadas.
- A fin de dar continuidad al proceso realizado en este trabajo, se ha introducido el concepto de registro del riesgo. Los registros del riesgo son herramientas valiosas que permiten no sólo ordenar la información obtenida durante el proceso ejecutado, sino también transferirla por completo a la siguiente fase. De esta forma se pretende que haya un seguimiento adecuado durante cada etapa del proyecto, que exista una revisión continua de la información y que la misma sea actualizada conforme se avanza en la excavación del túnel.

De igual manera, al mantener el registro de los riesgos se puede llevar a cabo la priorización de los mismos y así tomar mejores decisiones en cuanto a la necesidad de aplicar medidas de mitigación durante la excavación. Además, se puede realizar una adecuada asignación de los recursos disponibles, dando énfasis a aquellos riesgos que precisan de medidas más costosas para su mitigación.

## 7.2 Recomendaciones

- Se recomienda aplicar el método de observación durante la fase de excavación. Básicamente, este método permite monitorear el comportamiento del suelo y/o roca durante dicha etapa. Su ventaja radica en que se emplean las condiciones reales presentes en el proyecto, mismas que únicamente podrían determinarse durante el momento de la excavación. De esta forma, su aplicación conlleva a reducir la incertidumbre asociada al proceso constructivo, debido a que las premisas tomadas durante la etapa de diseño son corroboradas y, si es necesario, adaptadas a lo encontrado realmente en el campo.

Como parte de las técnicas que se pueden emplear para la aplicación de este método se mencionan: ejecución de perforaciones con recuperación de muestras, cartografía del frente de excavación, descripción visual del frente de excavación, ensayos *in situ*

(propiedades resistentes y deformacionales, tensiones naturales, permeabilidad), entre otros.

- Un plan de gestión de riesgos efectivo involucra la participación de un grupo multidisciplinario, en el cual exista una conjugación de ideas y opiniones que permita dar un criterio objetivo al proceso. De igual forma, la existencia de un grupo de este tipo es necesaria para que el manejo del riesgo abarque todos los aspectos de un proyecto, y no únicamente el geotécnico, como ha sido el caso de este trabajo.
- Para llevar a cabo una clasificación de riesgos más precisa se recomienda utilizar un método cuantitativo, para el cual es necesario emplear métodos probabilísticos que permitan determinar la posibilidad de ocurrencia de cada riesgo identificado; así como análisis detallados y/o simulaciones que cuantifiquen el impacto que cada riesgo genera. Se resalta que el uso de este método implica un mayor consumo de tiempo y costos, condiciones que no siempre están presentes en los proyectos.

No obstante lo anterior, se considera que al utilizar un método semi-cualitativo de clasificación, es posible obtener resultados confiables y crear un panorama bastante acertado de los riesgos existentes, como ha sido el caso del presente proyecto.

- Se recomienda incluir índices financieros en los criterios de aceptación del proyecto, de manera que se puedan clasificar los riesgos con base en los costos que se generarían a partir de su ocurrencia. Tal clasificación permitiría llevar un mayor control sobre el presupuesto del proyecto, ya que la asignación de recursos sería proporcional al nivel de riesgo existente en cada actividad.
- Se recomienda llevar a cabo el análisis financiero de cada riesgo identificado, de manera que se pueda comparar su cuantificación con los costos asociados a las medidas de mitigación propuestas. De esta forma es posible realizar un balance de costos e identificar, desde un punto de vista financiero, la conveniencia de aplicar medidas de mitigación.
- Conviene mencionar que los cambios en las condiciones geológico – geotécnicas del túnel pueden significar modificaciones en la eficiencia de las medidas de mitigación establecidas. Por tal motivo es necesario que antes de su aplicación se tenga un

conocimiento adecuado de las condiciones reales, a fin de asegurar que las medidas sean realmente efectivas y cumplan el propósito de su establecimiento. En este sentido, toma especial importancia la continua actualización del modelo geológico del túnel, ya sea mediante la ejecución de perforaciones al avance u otras técnicas que se utilicen como parte del método de observación, anteriormente sugerido.

- A fin de que los riesgos del proyecto sean llevados a un nivel tan bajo como razonablemente pueda ser, se recomienda implementar los conceptos empleados en este trabajo en las etapas restantes (construcción, operación y mantenimiento), tal como el método GeoQ sugiere. De esta forma se promueve una continua revisión de las condiciones que afectan el proyecto y el efecto que las mismas generan, dando como resultado una respuesta rápida y eficiente ante situaciones de riesgo, lo cual se traduce en ahorros significativos de tiempo y costos.

## REFERENCIAS

---

1. Barla, G. *Tunnelling under squeezing rock conditions*. Department of Structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino.
2. Brinkman, J. (2008). Risk Management applied to tunnels. En: *Curso avanzado LNEC*. Lisboa, Portugal.
3. C. Chaves (comunicación personal, febrero 25, 2012).
4. Carlsson, M. (2005). *Management of geotechnical risks in infrastructure projects*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil y Arquitectónica, Departamento de Ingeniería Civil y Arquitectónica, Instituto Tecnológico Royal. Estocolmo, Suecia.
5. Cervantes, J.F. y Granados J. (2006). *Análisis geológico – geotécnico y estructural del túnel de Cachí – propuesta de un túnel paralelo*. San José, Costa Rica.
6. Chin, C. y Chao, H. (2009). Risk Management for Underground Construction. En: *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Alejandría, Egipto.
7. Clayton, C.R.I. (2001). *Managing Geotechnical Risk: Improving Productivity in UK Building and Construction*. The Institution of Civil Engineers, London.
8. Cornejo, L. (1986). Interpretación geomecánica de la inestabilidad del frente de excavación en túneles construidos en terrenos de mala calidad. *Revista de obras públicas*, 133(3250), 719 – 727.
9. Della, N. (2009). *Servicios de consultoría para el Proyecto Hidroeléctrico Cachí. Informe sobre la evaluación del sistema constructivo del túnel del Proyecto Ampliación Cachí*. San José, Costa Rica.

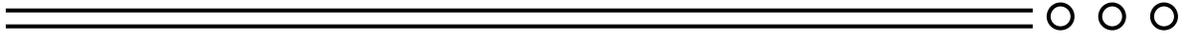
10. De los Ríos, M. (2009). *Plan de gestión de riesgos para la construcción del túnel de conducción superior en el Proyecto Hidroeléctrico El Diquís del Instituto Costarricense de Electricidad*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Master en Administración de Proyectos, Departamento de Administración de Proyectos, Universidad para la Cooperación Internacional. San José, Costa Rica.
11. González, L.; Ferrer, M.; Ortuño, L. y Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Prentice Hall.
12. Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). (2001). *Proyecto Hidroeléctrico Cachí ampliación: opción construcción de túnel 2*. San José, Costa Rica.
13. Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). (2010). *Informe de Factibilidad. Volumen I: Texto. Volumen II: Figuras*. San José, Costa Rica.
14. International Society for Rock Mechanics. (1994). *Comments and recommendations on design and analysis procedures for structures in argillaceous swelling rock*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci.
15. International Tunneling Association (ITA). (2004). *Guidelines for Tunneling Risk Management*. International Tunneling Association. Working Group No. 2.
16. Kitamura, I. (1978). Tunnelling under difficult conditions. En: *Proceedings of the International Tunnel Symposium*. Tokio, Japón.
17. López, C. (1998). *Ingeo túneles. Volumen II*. Madrid: Entorno Gráfico, S.L.
18. M. Jiménez (comunicación personal, marzo 16, 2012).
19. Paniagua, R. (2012). *Rozadora MT360: Proyecto Ampliación Planta Cachí*. En Instituto Costarricense de Electricidad. San José, Costa Rica.

20. Rojas, S. (2009). *Clase N°6 de túneles*. En Universidad de Los Andes. Merida, Venezuela. Extraído de: [http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/silviorojas/tuneles/Clase6\\_TunelesExcavadosConvencionalmente.pdf](http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/silviorojas/tuneles/Clase6_TunelesExcavadosConvencionalmente.pdf)
21. Singh B., Jethwa J.L. y Dube A.K. (1992). *Correlation between observed support pressure and rock mass quality*. Tunnelling and Underground Space Technology. Pergamon, vol 7.
22. Soto, C. (1974). *Sistemas para pre-estabilización y estabilización de la roca empleados con éxito en el túnel del Proyecto Hidroeléctrico Tapantí*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
23. Taylor & Francis Group. (2006). *Geotechnical Risk Management in Tunneling*. Bergheim, Austria: Shubert, P.
24. Telford, T. (2004). *Tunnel lining design guide*. London, UK.
25. The International Tunneling Insurance Group (ITIG). (2006). *A Code of Practice for Risk Management of Tunnel Works*.
26. van Staveren, M.Th. (2007). Extending to Geotechnical Risk Management. En: *ISGSR 2007 First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk*. Shanghai, China.
27. van Staveren, M.Th. y Bles, T.J. (2009). Geo Risk Scan – a successful ge management tool. En: *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Alejandría, Egipto.
28. van Staveren, M.Th. *Suggestions for Implementing Geotechnical Risk Management*. Delft, Holanda: Deltares and Delft University of Technology.

29. van Staveren, M.Th. (2006). *Uncertainty and ground conditions: A Risk Management Approach*. Oxford: Butterworth Heinemann.
30. Wagner, H. y Knights, M. (2006). Risk Management of Tunneling Works. En: *Workshop on safety in tunnels and underground structures*. Riyadh, Arabia Saudita.
31. Washington State Department of Transportation. (2010). *Project Risk Management: Guidance for WSDOT Projects*. Olympia, WA.
32. Yoo, W. (2006). Korean Risk Management Practices: a contractor´s perspective. En: *ITA-WTC2006 Open Session*. Seúl, Corea del Sur.
33. Zamora, J.P. (2004). *Análisis geotécnico de desempeño para excavación con TBM en roca: aplicación al túnel de carga de la Central Hidroeléctrica La Joya*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

# **APÉNDICE A**

## **Registro de rendimientos de la rozadora**



## REGISTRO DE AVANCE CON ROZADORA

Fecha: \_\_\_\_\_

Estación inicial: \_\_\_\_\_

Hora inicial: \_\_\_\_\_

Estación final: \_\_\_\_\_

Hora final: \_\_\_\_\_

Avance de la rozadora (m): \_\_\_\_\_

### Descripción de los materiales presentes

Clasificación RMR

GSI

### Parámetros de la rozadora

Presión de empuje

Velocidad de giro

Consumo de picas

Uso de aspersores  sí  no

### Tiempos

Excavación o desgaste

Reparaciones  Inspecciones

Otros

### Observaciones

Realizado por: \_\_\_\_\_

# **APÉNDICE B**

## **Registros del riesgo**



**Identificación:** PHCT2 - R1  
**Riesgo:** Condiciones geológicas inesperadas

Causas	Potencial impacto	Pre MR			Clasificación	Medidas de mitigación sugeridas	Post MR			Clasificación	Medidas de mitigación tomadas
		P	I	R			P	I	R		
1. Incertidumbre asociada a condiciones geológicas. 2. Campaña exploratoria pobre o inadecuada. Errores en la interpretación de 3. los resultados obtenidos en la investigación previa. 4. Homogeneidad supuesta en secciones del túnel. Condiciones diferentes a las 5. encontradas en las etapas de investigación.	1. Retrasos en el cronograma de trabajo. 2. Costos no contemplados en el presupuesto.	3	2	6	Menor	No es necesaria la aplicación de medidas de mitigación.					

**Observaciones:**

**Identificación:** PHCT2 - R2  
**Riesgo:** Inestabilidad del frente de excavación

Causas	Potencial impacto	Pre MR			Clasificación	Medidas de mitigación sugeridas	Post MR			Clasificación	Medidas de mitigación tomadas
		P	I	R			P	I	R		
Presencia de materiales de baja calidad mecánica (baja capacidad autosoportante). 1. Presencia de agua. Resistencia del macizo menor 3. que posibles presiones de agua.	1. Desprendimientos de bloques. 2. Sobreexcavaciones. 3. Pérdida de sección del túnel. 4. Retrasos considerables en el cronograma de trabajo. 5. Aumento de costos. 6. Inseguridad laboral. 7. Daños a la rozadora.	4	4	16	Crítico	1. Perforaciones al avance. 2. Tratamiento con inyección. 3. Sistemas de sostenimiento. 4. Sistema "paraguas". 5. Excavación por fases.	2	3	6	Menor	

**Observaciones:**

**Identificación:** PHCT2 - R3  
**Riesgo:** Flujo de agua hacia el túnel

Causas	Potencial impacto	Pre MR			Clasificación	Medidas de mitigación sugeridas	Post MR			Clasificación	Medidas de mitigación tomadas
		P	I	R			P	I	R		
1. Presencia de materiales muy fracturados. 2. Alta permeabilidad del macizo rocoso. 3. Existencia de conductos conectados con la línea de túnel. 4. Zonas de baja cobertura. 5. Zonas de falla.	1. Inestabilidad del frente de excavación. 2. Inundaciones. 3. Abatimiento del nivel freático regional. 4. Retrasos considerables en el cronograma de trabajo. 5. Aumento de costos.	4	4	16	Crítico	1. Perforaciones al avance. 2. Tratamiento con inyección. 3. Construcción de acueductos. 4. Sistemas de bombeo.	2	3	6	Menor	

**Observaciones:**

**Identificación:** PHCT2 - R4  
**Riesgo:** Avance a través de zonas de falla

Causas	Potencial impacto	Pre MR			Clasificación	Medidas de mitigación sugeridas	Post MR			Clasificación	Medidas de mitigación tomadas
		P	I	R			P	I	R		
1. Inclinación desfavorable con respecto al túnel.	1. Rompimiento de sellos hidrogeológicos.	4	4	16	Crítico	1. Perforaciones al avance.	2	3	6	Menor	
2. Tipo de material de relleno.	2. Caída de bloques.					2. Tratamiento con inyección.					
3. Espesor de la falla.	3. Deformaciones.					3. Sistemas de sostenimiento.					
4. Grado de alteración de la falla.	4. Disminución de la velocidad de excavación.					4. Sistema "paraguas".					
	5. Retrasos considerables en el cronograma de trabajo.					5. Excavación por fases.					
	6. Aumento de costos.					6. Túnel piloto.					

**Observaciones:**

**Identificación:** PHCT2 - R5  
**Riesgo:** Afectación por voladuras

Causas	Potencial impacto	Pre MR			Clasificación	Medidas de mitigación sugeridas	Post MR			Clasificación	Medidas de mitigación tomadas
		P	I	R			P	I	R		
1. Diseño inadecuado de la voladura. 2. Presencia de materiales muy fracturados.	1. Desprendimiento de bloques. 2. Lanzamientos incontrolados de fragmentos de roca. 3. Producción excesiva de polvo.	2	2	4	Despreciable	No es necesaria la aplicación de medidas de mitigación.					

**Observaciones:** Se debe prestar atención a la zona comprendida entre las estaciones 3+790 y 4+000, donde se ha previsto la presencia de rocas de mala calidad (materiales alterados y fracturados), por lo que al aplicar voladuras se puede incrementar el fracturamiento de la roca remanente, provocando alguno(s) de los impactos indicados.

**Identificación:** PHCT2 - R6  
**Riesgo:** Afectación al túnel existente

Causas	Potencial impacto	Pre MR			Clasificación	Medidas de mitigación sugeridas	Post MR			Clasificación	Medidas de mitigación tomadas
		P	I	R			P	I	R		
1. Vibraciones por voladuras.  2. Relajamiento excesivo del macizo rocoso.  3. Variación de las presiones hidrostáticas.	1. Afectación del revestimiento del túnel actual (fisuras).  Irregularidad en el funcionamiento normal de la Planta.	2	4	8	Menor	No es necesaria la aplicación de medidas de mitigación.					

**Observaciones:**

**Identificación:** PHCT2 - R7  
**Riesgo:** Uso de método de excavación nuevo para el ICE

Causas	Potencial impacto	Pre MR			Clasificación	Medidas de mitigación sugeridas	Post MR			Clasificación	Medidas de mitigación tomadas
		P	I	R			P	I	R		
Túnel de Cachí es la primera oportunidad en la que se aplica este método. Inexperiencia en cuanto a su aplicación a la geología del país. Variación del comportamiento de la máquina de una sección a otra. Movimientos laterales inesperados. Dificil penetración en el frente de excavación. Máquina no proporciona soporte del frente de excavación.	1. Inestabilidad del frente de excavación. 2. Perfilado irregular. 3. Bajos rendimientos. 4. Detención de la excavación. 5. Aumento de costos.	4	3	12	Considerable	1. Capacitación continua del personal. 2. Disposición del método tradicional de perforación y voladura. 3. Registro de rendimientos y materiales presentes.	3	2	6	Menor	

**Observaciones:**

# **ANEXO A**

## **Perfil geotécnico de la línea de túnel**

